



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**PIEZOELEKTRICKÉ REZONÁTORY MEMS PRO
SENZORICKÉ APLIKACE**

PIEZOELECTRIC MEMS RESONATORS FOR SENSING APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Klempa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Imrich Gablech

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Jaroslav Klempa

ID: 174213

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Piezoelektrické rezonátory MEMS pro senzorické aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou piezoelektrických rezonátorů MEMS pro senzorické aplikace. Prostudujte možnosti jejich konstrukce a princip funkčnosti. Na základě získaných poznatků navrhnete, nasimulujete, vyrobte a charakterizujete piezoelektrické rezonátory MEMS. Při realizaci se zaměřte na rozměry piezoelektrických rezonátorů MEMS z hlediska jejich výsledných parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Imrich Gablech

Konzultant: Ing. Jan Pekárek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje základním postupům a procesům při výrobě mikroelektromechanických systémů. Pozornost je věnována materiálovým vlastnostem, depozičním, litografickým a obráběcím procesům. Dále jsou v práci popsány základní principy a aplikace piezoelektrických rezonančních struktur. Praktická část se věnuje simulaci rezonátorů pomocí metody konečných prvků v simulačním prostředí ANSYS® Workbench, jejich výrobě a ověření funkčnosti a přesnosti simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS, piezoelektrina, rezonátor, tenké vrstvy, mikroobrábění, rezonanční frekvence

ABSTRACT

Basic principles and processes used during fabrication of microelectromechanical systems are presented in this work. This thesis is focused on material properties, deposition, lithographic and micromachining processes. Fundamental principles and applications of piezoelectric resonant structures are described as well. Final part of this work is devoted to simulation of resonant beams using FEM method in ANSYS® Workbench, practical fabrication and characterization of piezoelectric MEMS resonators.

KEY WORDS

MEMS, piezoelectricity, resonator, thin films, micromachining, resonant frequency

KLEMPA, J. *Piezoelektrické rezonátory MEMS pro senzorické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Imrich Gablech.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Piezoelektrické rezonátory MEMS pro senzorické aplikace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Imrichu Gablechovi za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc, ochotu, trpělivost, a hlavně za cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Pekárkovi, Ph.D. za cenné konzultace a konstruktivní kritiku mé práce a také Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za pomoc s měřením a charakterizací rezonátorů.

Tato práce vznikla v rámci centra CEITEC – Středoevropského technologického institutu s intenzivní pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.

OBSAH

Úvod	8
1 Materiály a technologické postupy	10
1.1 Volba materiálů a procesů	10
1.1.1 Výrobní postupy a technologie	10
1.1.2 Materiály a jejich požadavky a problémy	10
1.2 Depozice tenkých vrstev	11
1.2.1 Fyzikální depozice z plynné fáze	11
1.2.2 Chemická depozice z plynné fáze	15
2 Litografie	19
2.1 UV Litografie	19
2.2 Elektronová litografie	21
3 Mikroobrábění	22
3.1 Objemové mikroobrábění	22
3.1.1 Mokrý leptání	22
3.1.2 Suchý leptání	23
3.2 Povrchové mikroobrábění	24
4 Piezoelektrické MEMS rezonátory	25
4.1 Principy činnosti	25
4.1.1 Piezoelektrický jev	25
4.1.2 Rezonance	26
4.1.3 Metody pro určení kvality rezonátorů	26
4.2 Piezoelektrické materiály	27
4.3 Aplikace piezoelektrických MEMS rezonátorů	27
5 Simulace piezorezonátorů	30
5.1 Metoda konečných prvků	30
5.1.1 Použité materiály	31
5.2 Výsledky modální analýzy	32
5.3 Výsledky harmonické analýzy	34
6 Výroba a charakterizace	35
6.1 Výroba	35
6.2 Charakterizace	41

7 Závěr	45
Literatura	46
Seznam obrázků	50
Seznam symbolů, veličin a zkratk	52

ÚVOD

Mikroelektromechanické systémy (MEMS) nebo také mikrosystémové technologie (MST) je souhrn všech technik a procesů sloužících k navrhování a výrobě finálních miniaturních produktů, které jsou velmi často specializované pro jedinou aplikaci. Jsou to miniaturní vestavěné systémy zahrnující jednu nebo více mikroobráběných komponentů a struktur, které kombinují mechanické a elektrické prvky. Často také integrují menší funkce dohromady na jeden čip pro větší praktičnost (například skombinování akcelerometru s elektrickým obvodem pro sebe analýzu [1]). První koncepty mikroelektromechanických systémů a výrobních technologií se objevily již v šedesátých letech a od té doby bylo vydáno nespočet publikací na toto téma a jejich potenciál s každým dalším rokem rapidně roste. MEMS jsou vyráběny na povrchu nebo přímo v objemu z křemíkových desek zvaných wafer pomocí technologií a materiálů používaných pro výrobu integrovaných obvodů [1].

Automobilový průmysl by se dnes již neobešel bez akcelerometrů, gyroskopů a senzorů tlaku. Původně používané akcelerometry pro airbagy byly stavěné z makro součástek, které byly velké, a jejich cena dosahovala desítek dolarů. Nyní jsou již vyráběny pomocí technik známých z výroby integrovaných obvodů a jejich cena je mnohonásobně nižší. Další velké využití MEMS technologií je v měření tlaku. Cena takovýchto senzorů je tak nízká, že se instalují do kol všech nových automobilů [2]. MEMS gyroskopy jsou dnes také nepostradatelnou součástí automobilů, kde zabezpečují například systém ochrany proti převrácení, GPS navigaci nebo elektronickou stabilizaci řízení. Používají se také v množství armádních systémů a leteckých aplikacích. V neposlední řadě však nacházejí velké uplatnění ve spotřební elektronice jako senzory do mobilních telefonů a stabilizátory kamer u fotoaparátů [2].

Velká pozornost je také věnována odvětví MEMS zabývající se tekutinami v mikro měřítku tzv. mikrofluidikou. Každé potrubí, regulátory tlaku, kontroly proudění, pumpy a další je nebo bude možno vyrobit za pomoci této technologie. Využití mikrofluidních výrobků nachází uplatnění v přírodních vědách, farmaceutickém průmyslu a zemědělství. Nejpokročilejší a nejvyvinutější aplikací je však výroba tiskových hlav pro inkoustové tiskárny [2-4].

Zavedením optických prvků do MEMS technologií vzniká odvětví MOEMS. Typickým příkladem je optická čtečka kódu. Tu je možné sestavit pomocí velmi malého zrcátka, které se může pohybovat za pomoci elektrického impulzu. Toto zrcátko odráží světelný paprsek na čárový kód, pohybem zrcátka se paprsek přesune po celém čárovém kódu a odražené světlo je digitálně převedeno na kód [5]. Nejvyvinutější a nejrozšířenější je však technologie zvaná Digital Light Processing (DLP) od firmy Texas Instruments [2,6]. Tato technologie používá početná pole hliníkových mikro zrcátek (DMD), která jsou používána jako velmi dobré digitální projektory. Každé zrcátko, kterých je na jednom čipu přes milion, odpovídá jednomu pixelu ve výsledném obrazu, a může být nezávisle na ostatních otáčeno [2,7].

Využití rezonančních MEMS zahrnuje širokou škálu současných aplikací. Uplatnění nachází při výrobě inerciálních senzorů jako akcelerometrů, které slouží k detekci zrychlení v různých osách, a gyroskopů, které měří úhlovou rychlost změny pohybu [8]. Speciálně povrchově upravené rezonátory se používají pro detekci plynů a stopových prvků bio-chemických analytů [9]. Odvětví zvané BioMEMS využívá změny rezonanční

frekvence k vážení buněk, virů, proteinů a jiných látek [10]. Jako další aplikaci můžeme jmenovat takzvaný energy harvesting [11], který sesbírá nevyužitou energii z okolního prostředí a přemění ji na energii elektrickou. Tento systém je velmi zajímavý, jelikož může nahradit výměnu baterií a v případě, že je navržen správně, dokáže poskytnout dostatečnou energii po celou životnost mikrosystému [12]. Rezonanční MEMS se mohou využít i k měření stejnosměrného proudu [13], magnetického pole [14] a měření vlastností tekutin [15,16].

1 MATERIÁLY A TECHNOLOGICKÉ POSTUPY

Tato část se věnuje základním materiálům, používaným technologickým postupům a problémům spojených s výrobou MEMS. Nejzákladnějším materiálem pro výrobu MEMS je křemík v podobě waferů, na který se pak deponují tenké vrstvy oxidů a nitridů křemíku, hliník, titan, wolfram a jiné. Dalšími důležitými materiály ve výrobním procesu jsou polymery, sloužící jako fotorezisty nebo funkční vrstvy, a polyimidy [17,18].

1.1 Volba materiálů a procesů

Hlavním aspektem při výběru materiálů je určení finální aplikace. Z hlediska biokompatibility nelze například použít piezoelektrická keramika PZT (pevný roztok dvou sloučenin – PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT)) jelikož by došlo k zničení organismů, které by se s ním dostaly do styku, což je hlavním problémem zejména u implantovaných zařízení. PZT také není kompatibilní s procesem doplňující se kov-oxid-polovodič (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – CMOS) a jeho zpracování bývá často náročné časově i finančně. Jelikož se při výrobě jedná o velikosti řádově mikrometrů, je třeba dbát nejen na čistotu výrobního prostředí, ale také na čistotu depozičních aparatur. Příkladem zanesení nečistot do systémů může být například depozice oxidu zinečnatého, který ochotně difunduje do ostatních kovů (stěn reaktorů).

1.1.1 Výrobní postupy a technologie

Během posledních let se technologie CMOS stala převládající technologií při výrobě integrovaných obvodů (IO). Bylo vynaloženo velké úsilí ke zvýšení produkce, optimalizaci procesů a spolehlivosti, zatímco velikost a cena stále klesají [19].

Technologický postup CMOS lze rozdělit do čtyř kroků: depozice, vytvoření motivu, dopování a leptání. Tento postup se opakuje při výrobě každé vrstvy. Nejprve se nanese tenká vrstva (například SiO_2) a následně se pokryje fotorezistem, na který se za pomoci litografie přenesou požadované motivy. Poté je vzor přenesen do vrstvy pod fotorezistem leptáním. Dalším krokem může být dopování za použití difúze a iontové implantace, které slouží ke změně koncentrace nosičů náboje, za účelem vytváření polovodičových přechodů a tranzistorů. Tyto kroky se opakují dle výrobního procesu a návrhu zařízení [20].

MEMS využívají tohoto technologického procesu, kdy bývají vyráběny přímo na jednom čipu v procesu CMOS spolu s řídicí elektronikou, např. takzvané laboratoře na čipu (Lab-on-a-Chip – LoC). Druhým způsobem je výroba samostatných součástek, které nedosáhnou tak velké miniaturizace, levnější výroby a snížené spotřeby [21].

1.1.2 Materiály a jejich požadavky a problémy

Výběr správných materiálů a jejich depozice jednoznačně určuje výsledný produkt a jeho vlastnosti. MEMS pracují na elektro-mechanickém principu a nestačí tedy, aby materiály splňovaly určité elektrické vlastnosti, ale musí mít i dobré mechanické vlastnosti jako pružnost, pevnost a tuhost. Dalším kritériem je kompatibilita s výrobním procesem. Některé materiály (např. PZT) potřebují dodatečné výrobní kroky, aby byla zaručena jejich funkčnost.

Neméně závažným problémem je pak teplotní roztažnost. Jelikož je používáno velké množství materiálů od křemíkových substrátů, keramických materiálů (AlN, PZT a ZnO) a kovů po polymery a organické sloučeniny, pohybuje se součinitel teplotní roztažnosti v řádově velmi odlišných hodnotách. S tím souvisí i velikost pnutí, které je díky rozdílným teplotním roztažnostem zavedeno do vrstev a struktur. Toto pnutí může způsobit delaminaci vrstev, praskání, prohýbání a kroucení struktur. Správným nastavením jednotlivých procesních kroků však lze toto pnutí minimalizovat nebo i úplně eliminovat.

Zvláštní pozornost musí být věnována BioMEMS zařízením, která přichází do kontaktu s živými tkáněmi a organismy. Aby nedošlo k poškození těchto organismů a tkání, musí být splněna jistá biokompatibilita. Materiály vhodné pro BioMEMS se mohou rozdělit do tří skupin: (1) konvenční materiály, používané pro výrobu MEMS, (2) plastové a polymerní materiály (např. PDMS, parylen), (3) biologické materiály a prvky jako proteiny, buňky a tkáně [22]. Použití plastových a polymerních materiálů je velmi výhodné díky zvýšené biokompatibilitě, snazší výrobě, nižší ceně a jednoduchosti k prototypování s plastovými materiály [23,24].

S rychle se rozvíjejícími technologiemi rostou nároky na používané materiály a spolehlivost systémů. Selhání MEMS může být připisováno několika faktorům jako mechanické a elektrické namáhání, chemická a tepelná odolnost a stabilita během výroby i po výrobě. S těmito faktory je spojeno opotřebení, degradace materiálu, adheze, delaminace a praskání materiálů, přilnavost a další [25].

Pro mikroobrábění je velmi důležité kontrolovat velikost pnutí v jednotlivých vrstvách. Pnutí v tlaku může způsobit kolaps volně stojících nosníků a velké napětí v tahu může způsobovat prolamování vrstev. Nadměrné pnutí se může také projevit v ohnutí nahoru nebo dolů volně stojících mikro nosníků [26].

1.2 Depozice tenkých vrstev

V současné době existuje několik způsobů nanášení tenkých vrstev. Základní dělení je na dvě oblasti, kterými jsou fyzikální depozice z plynné fáze (physical vapor deposition – PVD) a chemická depozice z plynné fáze (chemical vapor deposition – CVD). Zásadní rozdíl spočívá v tom, že při PVD se požadovaný materiál deponuje přímo na povrch substrátu, zatímco při CVD na povrchu substrátu probíhá chemická reakce, která daný prvek vytváří [27].

1.2.1 Fyzikální depozice z plynné fáze

Fyzikální depozice z plynné fáze patří mezi základní způsoby nanášení tenkých vrstev. Jsou to depoziční procesy, při kterých je materiál pevného nebo kapalného skupenství přenesen ve vakuu ve formě atomů nebo molekul na substrát. Typické hodnoty depozičních rychlostí jsou 0,001–10 nm/s a liší se podle zvolené metody a možností depozičních aparatur [28].

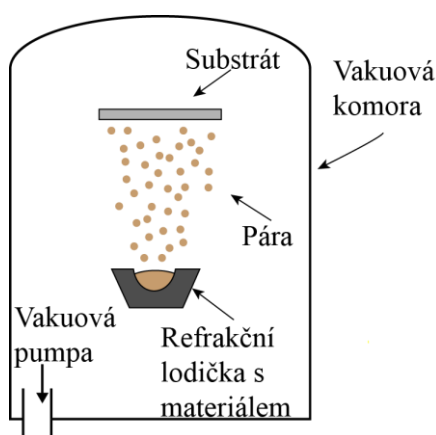
Napařování

Tento PVD proces spočívá v zahřívání zdrojového materiálu, který se přímou trajektorií dostává na substrát. Vakuové prostředí typicky pod 10^{-4} Pa pomáhá redukovat kontaminace z okolního prostředí. Zahřívání materiálu probíhá použitím refrakčních

(s vysokou teplotou tavení – např. wolframových) lodiček nebo drátů, ve kterých je materiál usazen, nebo za pomoci elektronového svazku (e-beam). Napařování je používáno k nanášení optických interferenčních povlaků (například antireflexních), zrcadlových a dekoračních povlaků, elektricky vodivých filmů, otěru a korozi odolných povlaků [28].

Termální napařování

Při tomto typu napařování (obr. 1.1) je materiál umístěn uvnitř odporově zahříváných refrakčních lodiček, košíků, kelímků nebo drátů, které jsou umístěné ve vakuové komoře. Průchodem elektrického proudu (obvykle desítky až stovky A) při nízkém napětí ($<10\text{ V}$) se zdrojový prvek postupně zahřívá, čímž dochází k roztavení a následnému odpaření materiálu. Touto metodou lze obvykle napařit materiály s teplotou odpařování nižší než 1500 °C [28].



Obr. 1.1: Termální napařování

E-beam napařování

Pro napařování refrakčních materiálů a většiny keramik, skel a např. uhlíku je nutné použít elektronové svazky. Výkon elektronových svazků se typicky pohybuje v hodnotách $10\text{--}50\text{ kW}$, ale někdy až 150 kW . Při použití vysokovýkonných svazků mohou depoziční rychlosti dosáhnout 50 nm/s [28]. Napařovaný materiál je umístěn ve vodou chlazeném kalíšku, na který dopadá elektronový svazek, který může být urychlován buď přímo na substrát, nebo za pomoci elektromagnetického pole ohýbán v úhlu 180 ° nebo 270 ° [29].

Naprašování

Naprašování je široké odvětví technik používané pro erozi materiálů a depozici tenkých vrstev. Využití nachází v aplikacích, kde je potřeba buď přesná mikroskopická eroze povrchů, nebo depozice tenkých vrstev na křemíkové wafery a magnetická média. Naprašování se uplatňuje při vyrábění povlaků náradí a řezacích povrchů (například žiletky), reflektivních povlaků skel, vnitřků plastových pytlíků, povrchů automobilových součástí a další [28].

Naprašovací proces zahrnuje fyzické „naprašení“ atomů nebo shluků atomů jejich vystřelením z povrchu zdrojového materiálu (terče) za pomoci bombardujících částic.

Tyto energetické částice jsou obvykle ionty plyných materiálů urychlované v elektrickém poli. Podle způsobu generování iontů rozlišujeme dvě třídy systémů: plazmu a iontové svazky [30]. V podstatě jediným rozdílem těchto dvou systémů spočívá v tom, že u plazmy je povrch určený k naprašování umístěn přímo v plazmě, zatímco v případě iontových svazků je plazma fyzicky oddělena od terče a ionty musí být extrahovány ze zdroje na terč.

Magnetronové naprašování

Termín „magnetron“ byl původně používán pro popis tub používaných pro generování mikrovln pro radary, který se dodnes k tomuto účelu používá. Tento původní, lehce modifikovaný systém, je dnes také využíván pro vytváření a udržování plazmy. Používané jsou dva hlavní druhy zdrojů: DC (direct current – stejnosměrný proud) magnetron a RF (radiová frekvence) magnetron. Mezi sebou se vizuálně prakticky neliší, rozdílné je jen použití napájení (stejnosměrné nebo radiová frekvence) [30].

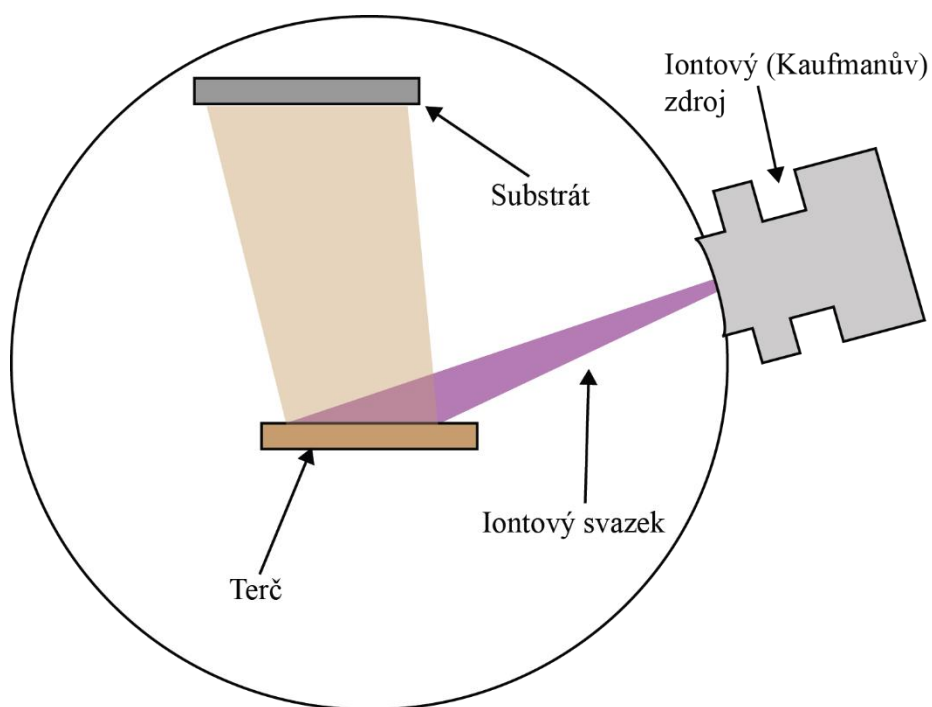
Magnetron využívá statické magnetické pole umístěné paralelně k povrchu katody. Sekundární elektrony, které jsou emitovány z katody kvůli iontovému ostřelování, jsou zachyceny magnetickým polem, které je vychýlí směrem kolmým k poli elektrickému a magnetickému. Toto elektromagnetické pole způsobuje pohyb elektronů paralelně k povrchu katody ve směru 90° pryč od magnetického pole. Když je však toto magnetické pole správně uspořádáno, dráha elektronů může být uzavřena do sebe a vytvoří tak kruh driftujících sekundárních elektronů. Tyto elektrony jsou „uvězněny“ v oblasti kolem katody. Nakonec ztrácí svoji kinetickou energii díky kolizím s atomy plynu (ionizací) nebo dalšími elektrony, a vzniká tak velmi hustá plazma [30].

Nejčastěji používanou průmyslovou frekvencí pro RF magnetron je 13,56 MHz nebo její násobek (2x nebo 3x) [4]. RF magnetron pracuje na trochu jiném způsobu než DC magnetron. V jedné části RF cyklu jsou anoda a katoda zaměněny, což eliminuje hromadění náboje na povrchu. Druhou výhodou je, že oscilace polí (na řídicí frekvenci) způsobuje přídavné pohyby elektronů uvnitř plazmy, což ve výsledku znamená nárůst hustoty plazmy [30].

Naprašování za pomoci iontových svazků

Naprašování za pomoci iontových svazků (IBD – ion beam deposition) se od magnetronového liší tím, že plazma je fyzicky oddělena od terče. Toto oddělení umožňuje řízení jednotlivých vlastností procesu jako je energie iontů, tok iontů, tvar iontového svazku a úhel dopadu iontů takřka nezávisle na sobě. U magnetronového naprašování je toto nemožné. IBD bývá často doprovázen přímým bombardováním substrátu ionty z asistovaného zdroje (IBAD – ion beam assisted deposition). Využívá se obvykle iontů Ar, N₂ nebo O₂ pro redukci pnutí ve vrstvách nebo pro reaktivní naprašování za vzniku oxidu nebo nitridů deponovaných kovů.

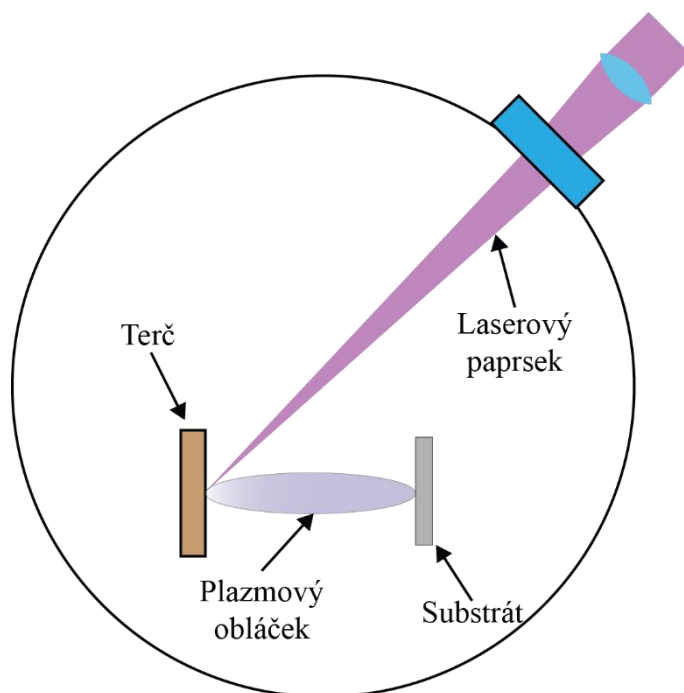
Na obr. 1.2 je znázorněno rozložení uvnitř komory s Kaufmannovým iontovým zdrojem. Jako pracovní plyn se ve většině případů používá Ar. Ionty jsou extrahovány z plazmového zdroje za pomoci dvou až tří mřížek, na které se přikládá elektrický potenciál, dle požadavků na parametry extrahovaného iontového svazku. Velikost přiložených elektrických potenciálů na mřížky dále ovlivňuje tzv. optiku (geometrii) iontového svazku dopadajícího na terč. Na extrakční elektrodu je přivedeno záporné napětí a ionty jsou poté urychlovány směrem k terči, který je na potenciálu země.



Obr. 1.2: Schéma iontového naprašovacího zařízení

Pulzní laserová depozice

Technika pulzní laserové depozice (pulsed laser deposition – PLD) používá vysokovýkonné laserové pulsy k roztavení, vypaření a ionizování materiálu z povrchu terče. Schématické rozložení je zobrazeno na obr. 1.3. Tato ablace materiálu produkuje svítivý plazmový obláček, který rychle expanduje směrem od povrchu terče směrem na substrát, na kterém kondenzuje jako tenká vrstva [31].



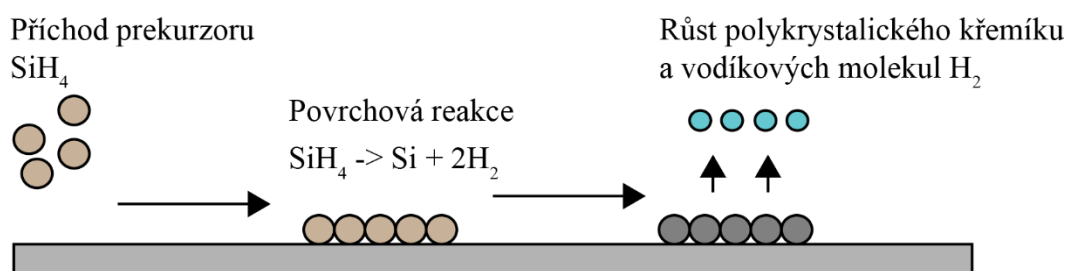
Obr. 1.3: Schématické znázornění principu PLD

PLD má několik výhod nad ostatními způsoby nanášení tenkých vrstev. Lze stechiometricky přenést materiál z terče na substrát, což znamená, že lze nadeponovat i tenké vrstvy složitých sloučenin bez nekontrolované změny chemického složení. Další výhodou může být volba depoziční rychlosti, kterou lze digitálně nastavit. Kontrola každé vrstvy tak může být precizně řízena počtem pulzů laseru [32]. Laser se používá jako externí zdroj, nedochází tudíž k znečišťování materiálů a proces může probíhat v inertním i neinertním prostředí.

PLD má však také řadu nevýhod. Tou hlavní je vysoce nerovnoměrná depozice způsobená tvarem plazmového obláčku. Plocha deponovaného materiálu je také velmi malá, typicky kolem 1 cm^2 . Průmyslové aplikace však vyžadují mnohem větší rozměry. Tyto nedostatky se však dají odstranit vhodným rotováním substrátu. Nanesený materiál také může obsahovat makroskopické globule z roztaveného terče, které velmi ovlivňují výslednou kvalitu vrstvy [31].

1.2.2 Chemická depozice z plynné fáze

CVD pracuje na principu inicializace chemické reakce na povrchu reakčního prvku na zahříváním substrátu. Na molekulární úrovni se tento proces dá rozdělit na tři části (obr. 1.4): příchod molekuly prekursoru, povrchová reakce, která zabuduje požadované reakční atomy, a odstranění nežádoucích produktů. Na rozdíl od naprašování se jedná o proces při vysokých teplotách, typicky (až na výjimky) v rozmezí $400\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto teplo slouží k rozdělování vazeb prekursorů a povrchové difuzi reakčních atomů.



Obr. 1.4: Princip CVD depozice polykrystalického Si pomocí SiH_4

Procesy chemické depozice se mohou dělit na CVD při atmosférickém tlaku (APCVD), CVD při nízkém tlaku (LPCVD) a plazmou asistované (Plasma-enhanced – PECVD). Dále existují další typy jako organokovové CVD (Metal-organic CVD – MOCVD), depozice atomových vrstev (atomic layer deposition – ALD), molekulární svazková epitaxe (molecular beam epitaxy – MBE) a mnoho dalších kombinovaných procesů.

Chemická depozice z plynné fáze při atmosférickém tlaku

První CVD proces byl proveden při atmosférickém tlaku (APCVD), je tak jedním z nejstarších procesů chemické depozice. Díky svým vlastnostem (průchodnosti a typickým teplotám $600\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) a nižší pořizovací ceně se používá dodnes. Při průmyslových aplikacích je do reaktoru přiveden pás s wafery, které jsou přímo vystaveny reakčním plynům při atmosférickém tlaku v dusíkovém prostředí. Pro krystalický růst vrstev se pohybují teploty nad $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro epitaxní je možné snížit teplotu až na $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [33].

Chemická depozice z plynné fáze při nízkém tlaku

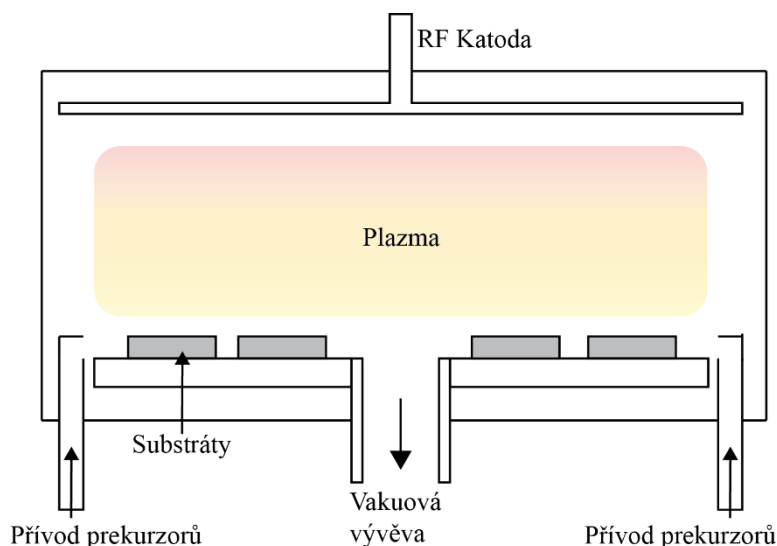
Už v 70. letech 20. století vědci dokázali, že snížený tlak vede k vysoce uniformním povlakům. Tohoto využívá LPCVD, která běžně pracuje v rozmezí 10–130 Pa. Výhoda LPCVD spočívá v tom, že kontaminanty jsou rychle vyčerpány ze systému. Toto snižuje generaci částic a nechtěnou oxidaci [8]. Díky nízkému tlaku jsou také minimalizovány kolize atomů a pravděpodobnost nukleací částic v plynné fázi, což umožňuje jistou flexibilitu ve volbě prekursorů. Depoziční rychlost je silně závislá na teplotě [8].

LPCVD probíhá v reakčně limitovaném prostředí. To znamená, že reakce probíhající uvnitř reaktoru nejsou ovlivňovány rychlostí proudění plynů a lze tedy do jednoho reaktoru umístit až 200 waferů, což je velice výhodné pro průmyslové aplikace [8].

Plazmou asistovaná chemická depozice z plynné fáze

Plazmou asistované CVD, jehož reaktor je zobrazen na obr. 1.5, používá elektrodu na vysokých frekvencích (13,65 MHz), která dodává energii potřebnou k rozdělení vazeb a oddělení elektronů pro příchozí plyny. Toto produkuje volné těžké prvky jako radikály, ionty a volné elektrony. Ionty a radikály jsou reaktivní a hrají roli při růstu tenkých vrstev, zatímco elektrony jsou potřebné k udržování plazmy. Aby byl proces soběstačný, jsou potřeba nízké tlaky uvnitř komory. Tím, že je energie dodávána plazmou, je možné docílit mnohem menší teploty substrátu, až 20 °C [34], což je velmi žádané u prvků citlivých na vyšší teploty. Klasická PECVD má však dva hlavní problémy: chybějící kontrola prvků uvnitř reaktoru a necílená iontová implantace a bombardování [33].

V mnoha případech je kvalita vrstev při nižších teplotách (PECVD) nižší než při vyšších (LPCVD) teplotách. PECVD má však možnost uzpůsobit proces přesně pro konkrétní aplikaci, například cíleným iontovým bombardováním z nízkofrekvenční plazmy (pod 4 MHz) k redukci pnutí v deponované vrstvě [35].



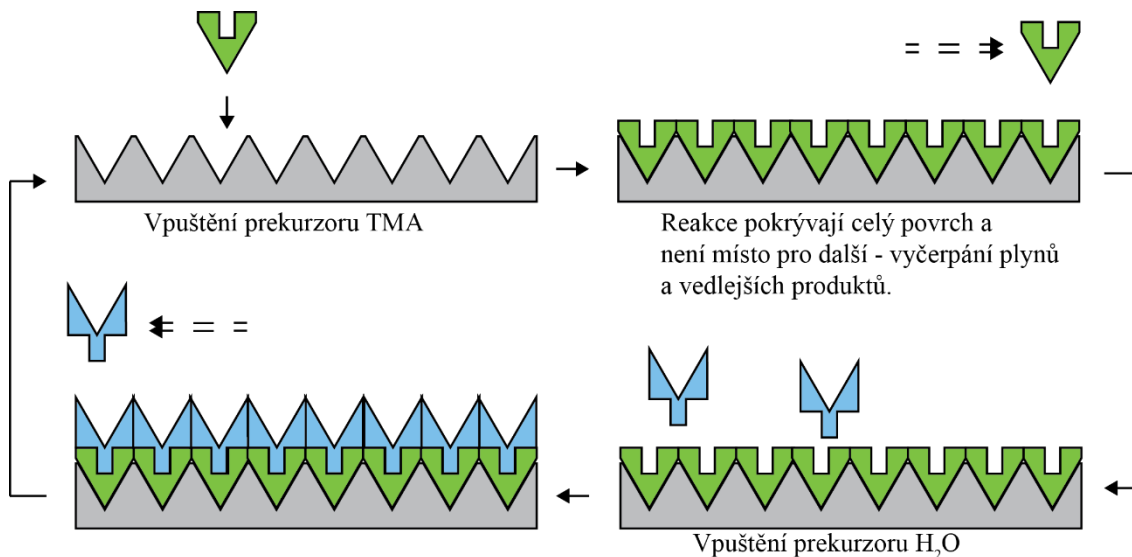
Obr. 1.5: Schéma PECVD reaktoru

Molekulární svazková epitaxe

MBE používá lokalizované svazky atomů nebo molekul v ultra vysokém vakuu (Ultra High Vacuum – UHV – 10^{-7} Pa). Svazky naráží do zahřívaného krystalu, což poskytuje dostatečnou energii k přemístění atomů z povrchu do krystalové mřížky substrátu a dochází tak k epitaxnímu růstu vrstev. UHV prostředí zajišťuje minimalizaci kontaminací a také volnou cestu svazkům bez kolizí k substrátu nebo chladným stěnám reaktoru, kde kondenzují a mohou tak být snadno odvedeny ze systému. Při zasunutí uzávěrky je svazek téměř okamžitě vypnut bez doznívajících efektů. Tyto vlastnosti umožňují velmi pomalý růst bez kontaminací, což je vhodné pro růst vysoce kvalitních krystalových struktur, a hlavně prudkou změnu složení přicházejícího proudu atomů, která je rychlejší než čas, za který stihne narůst jediná vrstva [36].

Depozice atomových vrstev

Miniaturizace v polovodičovém průmyslu vedla k velmi vysokým nárokům na konformní povlaky pro velmi vysoké poměry šířky k výšce (aspect ratio). Jelikož žádná jiná technika nedosahuje tak dobrých výsledků, získává ALD značný zájem průmyslu [37]. Většina ALD procesů je založena na dvousložkovém vytváření vrstev. Princip je znázorněn na obr. 1.6 a spočívá v tom, že je v komoře přítomen vždy jen jeden prekursor a tento proces je sebe limitující. To znamená, že když reaktant úplně pokryje povrch substrátu, vytvoří jednu atomovou vrstvu, která již neposkytuje místo pro další reakce, a je nutné zbývající prekursor odsát z komory tzv. vyplavením inertním plynem jako je argon či dusík. Pro depozici dalších vrstev je nutné komoru opět naplnit dalším prekurzorem, který reaguje s vrstvou vytvořenou předcházejícím prekurzorem. Tento proces se opakuje do nárůstu vrstvy požadované tloušťky [37].



Obr. 1.6: Princip ALD depozice Al_2O_3 vrstev střídavým napouštěním prekurzorů Trimethylaluminia (TMA) a H_2O

Výhody ALD zahrnují vysoce konformní povlaky, preciznost kontroly tloušťky vrstev až na úrovni jednotlivých atomových vrstev, a protože jsou reakce při každém cyklu dokončeny po celém povrchu, velmi hladké povlaky. Jednou z nevýhod ALD může

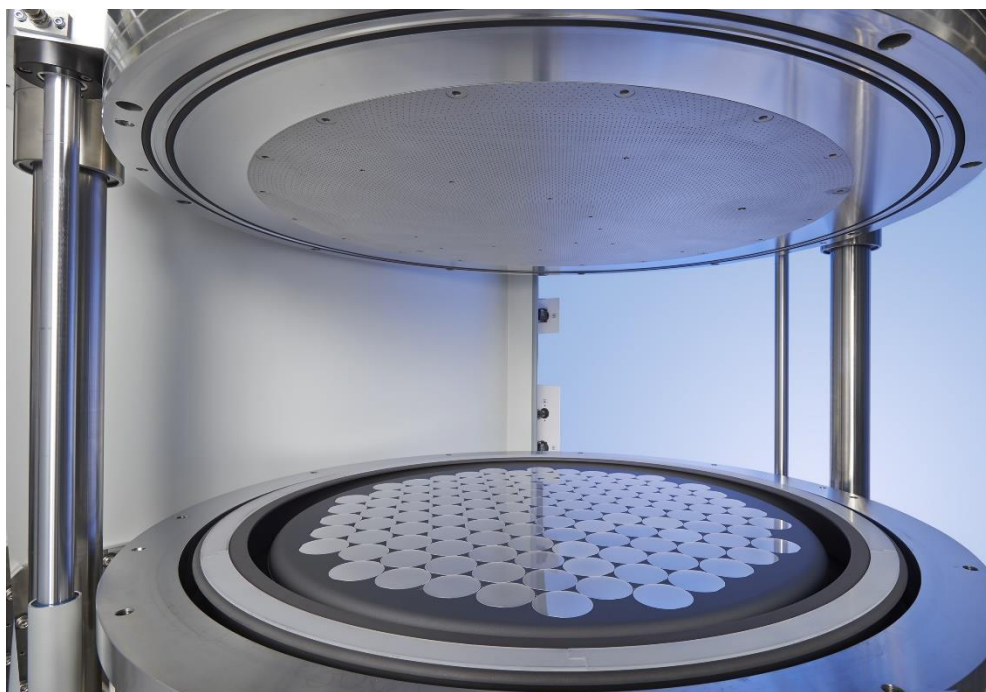
být pomalejší depoziční rychlost asociovaná s každým růstovým cyklem, jakožto celý proces je série diskrétních časových intervalů [37].

Chemická depozice z plynné fáze za použití organokovových sloučenin

MOCVD je typ chemické depozice, která využívá organokovových sloučenin jako prekurzorů pro svoji funkci. Prakticky všechny prvky z *III.* – *V.* a *II.* – *VI.* skupiny a jejich sloučeniny byly deponovány za pomoci MOCVD [38].

Hlavní výhody v porovnání s MBE jsou ve velké depoziční rychlosti při nebo blízko atmosférického tlaku, avšak pracovní tlaky mohou dosahovat až ultra vysokého vakua. MOCVD metoda je vhodná pro masové průmyslové produkce viz obr. 1.7, kde je zobrazen otevřený reaktor firmy AIXTRON [39]. MOCVD dokáže vytvářet vysoce konformní a uniformní povlaky [38].

Problémy s MOCVD zahrnují vysoké teploty (350–750 °C) [27], vysoké proudy plynů (které mohou vést k turbulencím místo laminárního proudění) a reakci některých prekurzorů s ostatními už v plynné fázi, což vytváří částice a snižuje depoziční rychlost [38].



Obr. 1.7: Otevřený MOCVD reaktor [39]

2 LITOGRAFIE

Litografie je proces vytváření obrazců za pomoci záření nebo přímo svazkem elektronů, které přenesou motiv na vrstvu světlocitlivého polymerního materiálu. Tento proces může být opakován několiknásobně a mohou tak vznikat různorodé struktury. Klasickým příkladem, kde se používá litografie, je například výroba tranzistorů nebo už poněkud ve větším měřítku výroba desek plošných spojů. Vývoj litografických metod za řadu let vedl k optimalizaci řady procesních podmínek, vybavení a materiálů k dosažení co nejmenších prvků a zvýšení hustoty integrace. Litografii můžeme rozdělit i podle typu expozice na (1) kontaktní litografii (contact printing), (2) litografii se separační vzdáleností (proximity printing) a (3) projekční krokovací litografii (projection printing) [40]. K dosažení těch nejmenších (mikronových a nanometrových) prvků byla vyvinuta i řada dalších metod jako elektronová litografie (e-beam), litografie fokusovaných svazků (focused ion beam lithography) a nanoimprintované litografie [41].

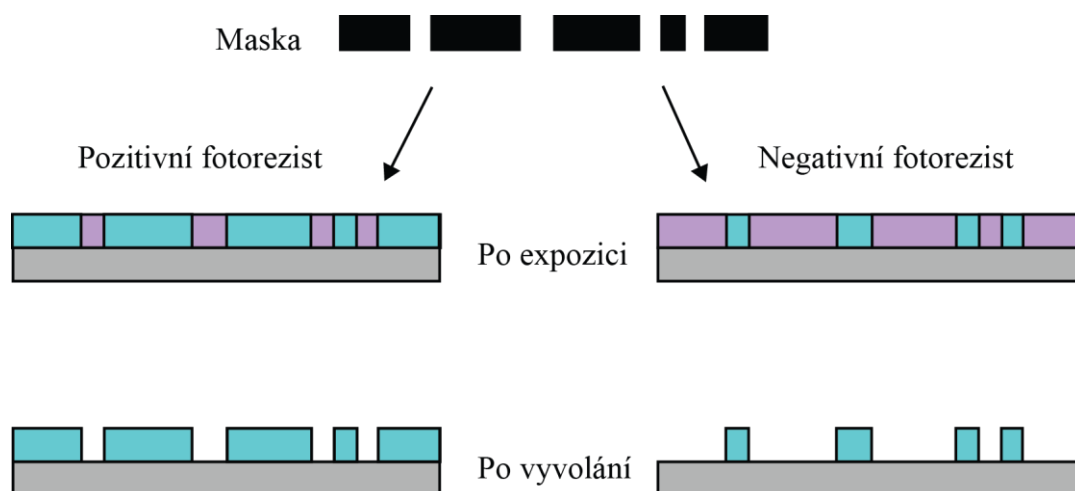
Ultra fialové záření (UV) se využívá k vytvoření obrazce otevřených částí masky na fotorezist. Podle typu použitého fotorezistu (pozitivního nebo negativního) pak části zasažené světlem polymerují, nebo se polymerní vazby přerušují. Masky jsou upevněny na optický projekční systém, kde je motiv na masce zaměřen na wafer pokrytý fotorezistem. Po expozici přes masku (osvětlení fotorezistu danou vlnovou délkou o požadované dávce záření) je potřeba fotorezist vyvolat, aby se vytvořil motiv na waferu, který slouží jako lepuodolná vrstva [41].

2.1 UV Litografie

Proces UV litografie se dá rozdělit do pěti kroků:

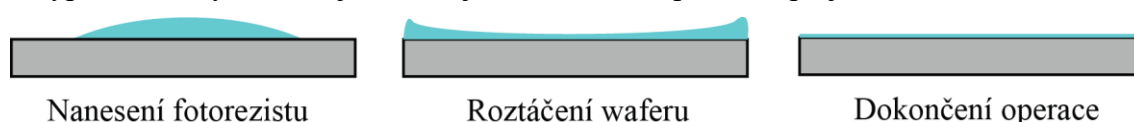
1. Depozice fotorezistu
2. Expozice fotorezistu
3. Vyvolání fotorezistu
4. Přenesení motivu
5. Odstranění fotorezistu

Typický fotorezist se skládá z několika druhů organických polymerů v rozpouštědle kombinovaném se světlocitlivými aditivami. Slouží k tomu, aby po osvětlení změnil svoji rozpustnost a umožnil vznik požadovaného motivu (obr. 2.1). Exponovaný motiv je pak více rozpustný (pozitivní fotorezist) nebo méně rozpustný (negativní fotorezist) ve vyvolávacím roztoku [41].



Obr. 2.1: Rozdíl mezi pozitivním a negativním fotorezistem

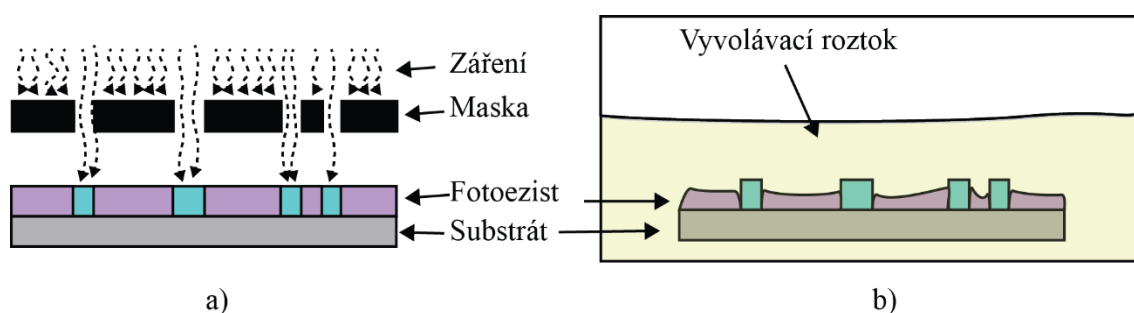
Depozice fotorezistu probíhá hlavně za pomoci rotačního nanášení (spin-coating), zobrazení procesu na obr. 2.2, nebo sprejového nanášení (spray-coating). K nanesení fotorezistu pomocí rotačního nanášení je potřeba rotující podklad s možností změny rychlosti otáčení. Spin-coating je vhodný pro nanášení fotorezistu na rovné plochy, k vyplnění různých tvarů je vhodnější nastříkání za pomoci spreje [41].



Obr. 2.2: Průběh depozice fotorezistu při rotačním nanášení pomocí spin-coateru

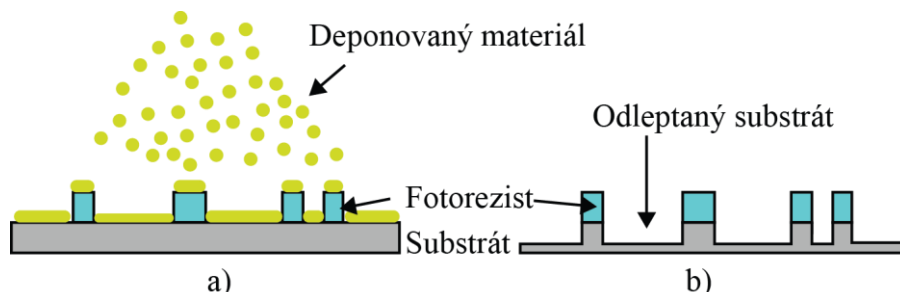
Před expozicí (obr. 2.3a) fotorezistu je nutné provést jeho vytvrzení (softbake) na vyhřívané plotně (hot plate) po dobu několika minut. Expozice fotorezistu se docílí upevněním waferu a masky do optického projekčního systému. Maska a wafer musí nejprve být sesazeny ve všech osách. Jakmile je umístění správné, UV záření o požadované dávce ozáří přes masku fotorezist, který tím změní svoje vlastnosti. Druhou možností expozice je tzv. přímá litografie, kdy po povrchu fotorezistu projíždí elektronový svazek nebo laserový paprsek.

Vyvolání fotorezistu (obr. 2.3b) probíhá ponořením naexponovaného fotorezistu na waferu do vhodného rozpouštědla (vývojky). Ponor po dobu 30 až 90 sekund do vývojky je obvykle dostačující k vyvolání a odstranění fotorezistu. K zastavení reakce je wafer vytáhnut z roztoku a ponořen do deionizované vody a poté sušen v proudu suchého plynu, typicky dusíku [41].



Obr. 2.3: a) Expozice fotorezistu a jeho následné b) vyvolání

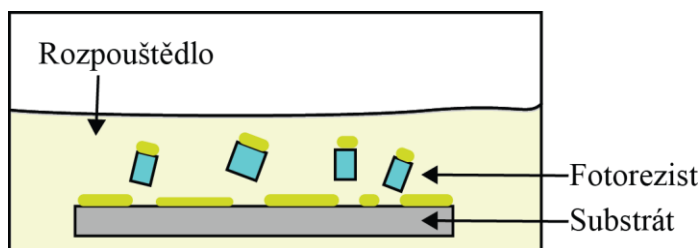
Přenesení motivu (obr. 2.4) znamená, že oblasti odkryté po vyvolání jsou přístupné buď k přidání, nebo odstranění materiálu. Odstraňování materiálu, jinak také leptání, se zakládá na tom, že fotorezist je odolný vůči leptacímu procesu, zatímco vrstva materiálu pod fotorezistem není. Dochází tedy k odleptávání míst ve vrstvě materiálu, která nejsou krytá fotorezistem. Pro přidávání materiálů se může využít technik diskutovaných v předchozí kapitole [41].



Obr. 2.4: Přenos motivu a) depozicí, b) leptáním

Odstranění fotorezistu probíhá jako finální úprava waferu. Po leptání se odstranění dosáhne buď pomocí plazmy nebo v jednoduché lázni naplněné odstraňovačem fotorezistu např. N-ethylpyrrolidon (NEP) [41].

Pro aditivní způsob nanášení může být odstranění fotorezistu dosaženo pomocí techniky zvané lift-off. Lift-off probíhá tak, že se celý wafer ponoří do vany s rozpouštědlem, které rozpouští pouze fotorezist (obr. 2.5). Po rozpouštění fotorezistu se vrstva, která na něj byla nadeponována po jeho vyvolání, odloupne v roztoku odstraňovače fotorezistu za případné asistence megazvuku nebo ultrazvuku [41].



Obr. 2.5: Znáznornění technologie lift-off – vystavení fotorezistu rozpouštědlu, které jej odplaví spolu s deponovaným materiálem.

2.2 Elektronová litografie

Tento typ litografie (EBL – electron beam lithography) používá, na rozdíl od UV litografie, elektrony ke změně rozpustnosti fotorezistu. S tím souvisí i jiný typ používaných fotorezistů (např. PMMA). Při průchodu elektronového svazku po vrstvě fotorezistu, téměř identickým způsobem jako u rastrovacího elektronového mikroskopu (Scanning electron microscope – SEM), se vytváří rastr substrátu. V těchto mikroskopech je používáno magnetické nebo elektrostatické pole k vychylování elektronového svazku. Přidáním elektrostatických plátů, které dokáží odrážet svazek mimo substrát, lze vytvářet i prázdná místa tudíž i požadovaný motiv. Rozlišení EBL může dosáhnout až 10 nm a při použití speciálních technik až 3–5 nm [42]. Expoziční rychlost je velmi pomalá pro velkoplošnou výrobu a proto je EBL používána hlavně pro výrobu masek, prototypů a také pro vědecké účely [41].

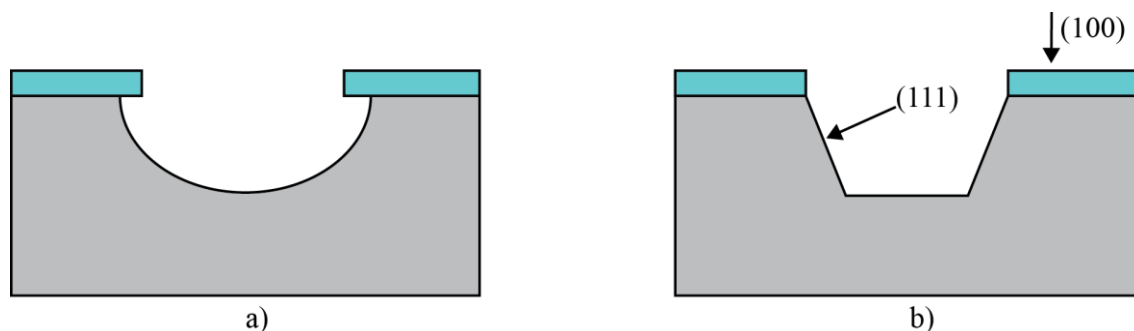
3 MIKROOBRÁBĚNÍ

Po litografickém procesu je k vytvoření požadovaných struktur potřeba odstranit materiál pomocí mikroobrábění. V MEMS technologiích existují dva základní typy obrábění: povrchové (surface micromachining) a objemové (bulk micromachining). Rozdíl spočívá v tom, že u povrchového obrábění se upravují jen vrstvy, které byly deponovány na substrát, a to jedna po druhé, zatímco objemové umožňuje odebírání materiálu přímo ze substrátu [43].

3.1 Objemové mikroobrábění

Objemové mikroobrábění používá jako základní stavební prvek samotný krystalický křemík, kde požadované struktury vznikají použitím suchých či mokrých leptacích technik. Objemové mikroobrábění často potřebuje procesní kroky i z druhé strany waferu, hlavně sesazení přední/zadní strana. Pomocí této techniky se dají vyrobit například tenké membrány a různé prohlubně a tvary v křemíku [43].

Pro objemové leptání křemíku existuje celá řada leptacích roztoků a technik. Jako základní rozdělení můžeme uvést leptání pomocí tekutin (také „mokrý“, typicky vodní roztoky) a pomocí par a plazmy (také „suchý“). Další důležitou vlastností je, zda je daný proces izotropní (ve všech směrech stejný) nebo anizotropní (orientačně závislý). Rozdíly znázorňuje obr. 3.1 [44].



Obr. 3.1: a) Izotropní leptání a b) anizotropní leptání křemíkového substrátu s (100) orientací

Leptací reakce se zakládají na oxidaci křemíku k zhotovení sloučenin, které se dají fyzicky odstranit ze substrátu. U mokrého leptání se toho dosáhne pomocí vysoce reaktivních sloučenin, jako jsou kyseliny a zásady. U suchého leptání závisí reakce na adsorpci halogenových sloučenin, jejich následné disociaci na reaktivní halogenové prvky a formaci nestálých křemíkových sloučenin [44].

3.1.1 Mokré leptání

Proces mokrého leptání se uskuteční ponořením substrátu do leptacího roztoku po určitou dobu, kterou určuje leptací rychlost (etch-rate) daného roztoku a požadovaná hloubka. Mezi hlavní nevýhody mokrého leptání patří malá reprodukovatelnost procesu a nebezpečí zanesení kontaminací na substrát. Mezi výhody patří především vysoká selektivita a jednoduchost procesu.

Izotropní mokré leptání

Typickým zástupcem této skupiny pro leptání křemíku je „HNA“, směs kyseliny fluorovodíkové (HF), kyseliny dusičné (HNO_3) a kyseliny octové (CH_3COOH). Kyselina dusičná řídí oxidaci křemíku, zatímco fluoridové ionty vytváří rozpustné sloučeniny H_2SiF_6 . Kyselina octová zabraňuje disociaci molekul HNO_3 na NO_3^- a NO_2^- čímž umožňuje přímo vznik rozpustné sloučeniny. HNA lze také použít bez kyseliny octové, ale jen pro velmi krátké leptací procesy (kvůli disociaci molekul HNO_3) [44].

Anizotropní mokré leptání

Anizotropní leptací roztoky leptají rychleji v jedné krystalografické rovině než v jiných. Mezi zástupce těchto leptadel patří hydroxidy alkalických zemin (KOH, NaOH, CsOH), TMAH (hydroxid tetramethylamonný) a EDP (Ethylendiamin pyrokatechol).

3.1.2 Suché leptání

Reaktivní iontové leptání

V těchto typech leptání je energie pro chemické reakce dodávána pomocí RF zdroje v nízkotlakých reakčních komorách. Použití reaktivního iontového leptání (RIE – reactive ion etching) má hlavní výhodu ve vysoké selektivitě křemík/maska pro velké množství organických i anorganických materiálů. Používané plyny většinou obsahují halogenidy (fluor, chlór, bróm), které jsou velmi reaktivní pro určité materiály, například Cl plazma je velmi vhodná pro leptání Al. Díky tomu, že energii dodávají ionty, se tento proces odehrává při relativně nízkých teplotách (70 °C) [44,45].

Hloubkové reaktivní iontové leptání

Vysoce anizotropní proces používaný k vytváření hlubokých a téměř kolmých stěn. Hloubkové reaktivní iontové leptání (deep reactive ion etching – DRIE) využívá technologii Boschova procesu a kryogeního leptání. Průmyslově nejrozšířenější je Boschův proces, jehož princip spočívá ve střídání dvou kroků – vyleptání jámy pomocí RIE a napuštění prekursoru (pasivace). Pasivace slouží k ochraně boků vyleptané prohlubně. Jelikož je RIE většinou anizotropní, odleptá se při dalším cyklu spodní část prohlubně. Tyto dva kroky se opakují do požadované hloubky [46].

Leptání pomocí par

Izotropní leptání dosahující velmi kvalitních výsledků bez potřeby velmi drahého a komplexního vybavení. Fluorid xenonový (XeF_2) využíváný pro leptání křemíku je izotropní a velmi selektivní pro hliník (Al), wolfram (W), oxid křemičitý (SiO_2) a fotorezist. XeF_2 leptá (kromě křemíku) například titan (Ti), molybden (Mo) a nikl (Ni) [47]. Tyto vlastnosti jej dělají velmi žádaným post procesním leptadlem pro integrované obvody, ačkoliv leptané povrchy jsou drsné [44]. Při tlaku nižším, než je 130 Pa, XeF_2 sublimuje ze své tuhé formy do plynné. Leptací rychlosti se za určitých podmínek mohou pohybovat v rozmezí 1–3 $\mu\text{m}/\text{min}$ [48].

3.2 Povrchové mikroobrábění

Povrchové mikroobrábění opracovává pouze tenké vrstvy deponované na substrát. Tyto tenké vrstvy slouží jako funkční materiál pro samotné aplikace. Nanáší se kombinace strukturních a obětních vrstev, kde obětní vrstvy po vyleptání uvolní strukturní prvky do prostoru. Díky tomu, že se obrábí často pouze jedna strana substrátu, lze tento proces jednoduše integrovat již do zaběhlých mikroelektronických procesů [43].

Povrchové mikroobrábění potřebuje kompatibilní materiály pro leptání strukturních a obětních vrstev. Strukturní materiály musí mít požadované fyzikální a chemické vlastnosti a splňovat mechanické požadavky pro danou aplikaci. Obětní vrstvy musí mít dobré mechanické vlastnosti, jako jsou dobrá adheze a nízká nebo ideálně nulová hodnota pnutí k zamezení poškození zařízení. Leptadla musí mít výbornou leptací selektivitu k odstranění pouze obětních vrstev [43].

4 PIEZOELEKTRICKÉ MEMS REZONÁTORY

Piezoelektrické krystaly jsou používány již řadu let v elektrotechnickém průmyslu k výrobě rezonátorů s vysokým činitelem jakosti, ostrou rezonancí a minimálními ztrátami. Jako alternativa k těmto součástkám se nabízí MEMS rezonátory, které nabízí menší rozměry, kompatibilitu s CMOS procesem a případnou přímou integraci do elektronických systémů [49].

Piezoelektrický rezonátor je elastické zařízení obsahující piezoelektrický materiál, který je možné uvést aplikováním střídavého elektrického pole o správné frekvenci do vibrujícího stavu. Působením nepřímého piezoelektrického jevu, tj. aplikováním elektrického pole na piezoelektrický materiál, se tělo rezonátoru dostává do pohybu kvůli deformaci krystalů uvnitř materiálu. Tato deformace však také vytváří náboj uvnitř krystalů (přímý piezoelektrický jev).

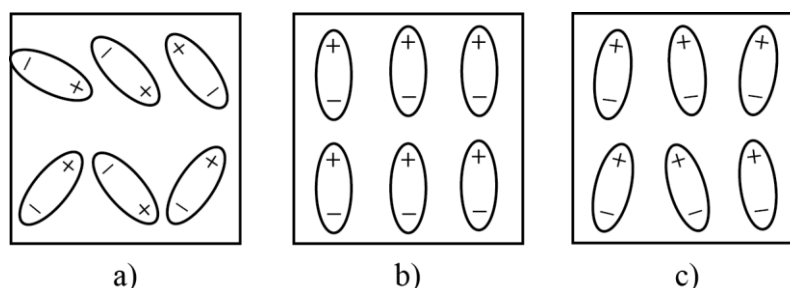
4.1 Principy činnosti

4.1.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je vlastnost materiálů přeměňovat mechanické namáhání na elektrický náboj. Nepřímý piezoelektrický jev funguje obráceně – v důsledku přiloženého elektrického pole dochází k deformaci materiálu. Při dosažení Curieho teploty, kdy dochází k narušení vnitřního uspořádání atomů, dochází i k zániku piezoelektrických vlastností.

Při přiložení vnějšího elektrického pole k materiálu se tento materiál přizpůsobí působení elektrického pole natočením molekul a jejich elektronů tak, že vznikají dipóly. Tento proces je nazýván polarizací. V případě střídavého elektrického pole nesmí jeho frekvence překročit relaxační dobu atomů materiálu, jinak dochází k zániku polarizace [52].

Pólování piezoelektrických materiálů probíhá z důvodu uspořádání dipólových momentů v jednom směru. Proces, znázorněný na obr. 4.1, probíhá přiložením silného stejnosměrného elektrického pole, většinou těsně pod Curieho teplotou, které uspořádá všechny dipóly jedním směrem. Po odstranění elektrického pole se tyto natočené dipóly nevrací do původní podoby, ale zůstávají natočeny ve směru působení elektrického pole, díky vzniku mikro defektů uvnitř krystalu.



Obr. 4.1: Proces pólování – a) před procesem, b) při procesu, c) po procesu

Běžně se k určení směru působení elektrického pole používá numerické značení, tj. 1 pro osu x , 2 pro osu y , 3 pro osu z . Z toho jsou odvozeny výsledné piezoelektrické koeficienty, určující vlastnosti materiálu. Nábojová konstanta d_{ij} vyjadřuje působení

elektrického pole v ose i (první index) na působení mechanického namáhání v ose j . Příkladem je piezoelektrický koeficient d_{33} , který určuje vlastnosti elektrického pole na mechanickém namáhání v ose z . Koeficient d_{12} by tedy určoval působení elektrického pole v ose x na mechanickém namáhání v ose y . Stejná pravidla platí i pro ostatní piezoelektrické koeficienty jako permitivita ϵ_{ij} , nebo mechanické pnutí e_{ij} [53].

4.1.2 Rezonance

Fyzikální jev rezonance je snaha systému kmitat při větší amplitudě na určitých tzv. rezonančních frekvencích než mimo tyto frekvence. Pokud se systém nachází v rezonanci, mohou i malé změny dodávané energie na vstupu způsobit velkou výslednou amplitudu systému.

Uvažujme jednostranně vetknutý nosník s počtem vrstev N . Pro konstantní délku l odpovídá h_i tloušťce, ρ_i hustotě a E Youngovu modulu pružnosti pro každou vrstvu. Tento nosník se může volně pohybovat v ose z .

Počáteční podmínky pro uchycený rezonátor jsou,

$$\zeta(0) = 0, \zeta'(0) = 0, \zeta''(l) = 0, \zeta'''(l) = 0, \quad (4.1)$$

kde $\zeta(y)$ je z výchylka v určitém bodě rezonátoru. Tyto podmínky říkají, že na upevněném konci je výchylka a strmost nulová, a že na volný konec rezonátoru nepůsobí žádná síla nebo tlak. Dosazením těchto podmínek do rovnic odvozených z druhého Newtonova zákona [50] lze získat rovnici pro určení modálního parametru λ_n :

$$\cos \lambda_n \cosh \lambda_n + 1 = 0. \quad (4.2)$$

Prvních pět kořenů rovnice (4.2) udává hodnoty modálních parametrů pro odpovídající rezonanční frekvence:

$$\lambda_n \cong 1,8751; 4,6941; 7,8548; 10,9955; 14,1372.$$

Pro n -tou rezonanční frekvenci více vrstvého rezonátoru platí rovnice:

$$f_n = \frac{(\lambda_n)^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\int E(z - z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (h_i \rho_i)} \right)}, \quad (4.3)$$

kde z_0 je neutrální osa rezonátoru, tj. část rezonátoru, která si zachovává původní délku při jeho ohýbání.

4.1.3 Metody pro určení kvality rezonátorů

Aby mohlo dojít k porovnávání různých druhů piezoelektrických MEMS rezonátorů, byly zavedeny parametry, které určují jejich vlastnosti, mezi základní parametry patří činitel jakosti Q a elektromechanický koeficient k_t .

Činitel jakosti rezonance určuje strmost rezonančního vrcholu vůči poklesu o 3 dB. Vypočítá se podle rovnice (4.4):

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f_{-3dB}}. \quad (4.4)$$

Elektromechanický koeficient k_t udává efektivitu konverze mechanické energie na elektrickou (i naopak), často se využívá ve druhé mocnině. Je definován podle vzorce (4.5) jako vzdálenost mezi rezonanční (f_r) a anti rezonanční (f_a) frekvencí [51]:

$$k_t^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}. \quad (4.5)$$

4.2 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály jsou druhem dielektrik, které je možné polarizovat nejen působením vnějšího elektrického pole, ale také pomocí mechanického tlaku. Existují polární (obsahují vlastní dipólový moment) a nepolární (dipólové momenty jsou náhodně uspořádány uvnitř krystalu a navenek se jeví jako neutrální) piezoelektrické materiály.

Většina piezoelektrických materiálů je anizotropních a jejich elektromechanické vlastnosti se tedy projevují jen v určitých krystalografických osách. To znamená, že v případě použití určitého materiálu (PZT) je nutné nejprve zajistit jeho správnou orientaci dipólů pólováním. Jiné materiály patřící do skupiny wurtzitů, jako AlN a ZnO, však pólování nepotřebují a jejich piezoelektrické koeficienty závisí na orientaci krystalů při depozici [49].

Často používaným piezoelektrickým a zároveň ferroelektrickým materiálem je PZT. Hlavní důvodem používání jsou výborné piezoelektrické vlastnosti. Oblast použití nachází hlavně při výrobě počítačových pamětí, MEMS převodníků a energy harvesterech. PZT je nutno pólovat k zajištění správných vlastností, což zahrnuje další procesní kroky. U PZT nebyla prokázána biokompatibilita ani kompatibilita s CMOS procesem [54].

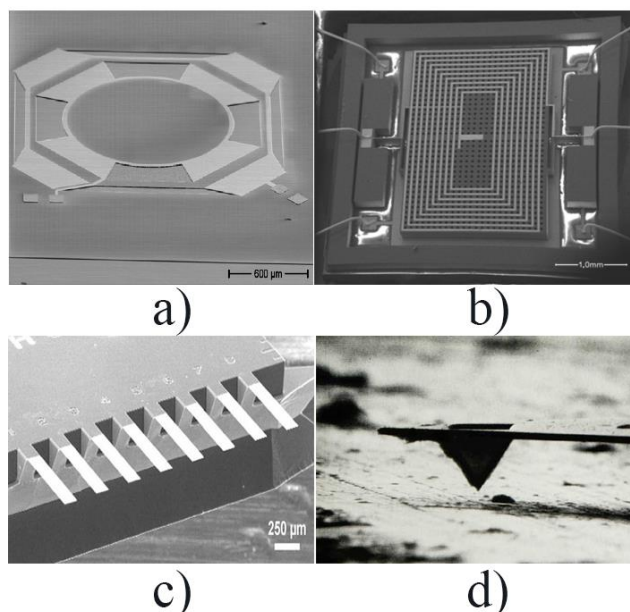
Oxid zinečnatý (ZnO) a nitrid hliníku (AlN) patří do wurtzitové krystalové skupiny a vykazují tedy piezoelektrické vlastnosti převážně jen v určité ose, konkrétně podél (001). Hlavní výhodou AlN je jeho kompatibilita s CMOS procesem, kdy u ZnO je problémem difúze kovů do depozičních aparatur [49]. Porovnání piezoelektrických a dielektrických vlastností materiálů je uvedeno v tab. 4-1 [55].

Tab. 4-1: Vybrané piezoelektrické a dielektrické vlastnosti AlN, ZnO a PZT [55,56]

Koeficienty	ZnO	AlN	PZT
$e_{31} (Cm^{-2})$	-0,51 ... -1,00	-0,6 ... -1,05	-8 ... -12
$d_{33} (pm/V)$	5,9 ... 10	3,9 ... 6,8	60 ... 130
ϵ_{33}	10,9	9,8 ... 10,5	300 ... 1300

4.3 Aplikace piezoelektrických MEMS rezonátorů

Prakticky všechny dříve vyráběné MEMS z křemíku jsou nyní také vyráběny (často i s vylepšenými vlastnostmi) z piezoelektrických materiálů. Vybrané MEMS jsou zobrazeny na obr. 4.2. Příkladem můžou být rezonátory, filtry, přepínače, energy harvestery, ultrazvukové převodníky, mikrofony, akcelerometry, gyroskopy, chemické a biologické senzory pro detekci plynů a molekul a další [49,53].



Obr. 4.2 a) MEMS akcelerometr [57], b) magnetometr [58], c) pole chemických senzorů [59], d) špička na mikro nosníku pro AFM [60]

Rozvoj rezonátorů přišel s představením AlN a hlavním komerčním úspěchem tzv. (T)FBARů (Thin-Film Bulk Acoustic Resonators), které využívají masové produkce CMOS procesů. Princip je podobný jako u rezonátorů přenášejících povrchovou vlnu (SAW) – elektrická energie je přeměněna na mechanickou a zaměřena do objemu materiálu [61].

Malé autonomní senzory se staly nedílnou součástí moderního života. Jelikož je napájení těchto senzorů uskutečňováno pomocí baterií, není zajištěna dlouhá výdrž těchto systémů a omezena je i velikost. Z tohoto důvodu je věnována pozornost tzv. energy harvesterům. Příkladem může být klasický rezonátor, který je opatřen větší hmotou na určitém místě, aby docházelo k větší výchylce. Výkon generovaný těmito zařízeními může být 3–40 μW pro PZT a 2–13 μW pro AlN. Pro nezapouzdřené zařízení však bylo demonstrováno až 60 μW pro AlN [62]. Z toho plyne, že pouzdrění a s tím související výsledné podmínky (teplota, tlak, vlhkost) mají výrazný vliv na velikost generovaného výkonu.

Ultrazvukové techniky jsou používány v medicíně, strojírenství, stavebnictví a v průmyslu všeobecně k detekci mikroskopických defektů v materiálech. Zvýšení rozlišení ultrazvukových systémů přispívá k detekci menších (až submikronových) defektů. Podle teoretických znalostí by měli systémy pracující na frekvenci 30 MHz – 1 GHz defekty detekovat. Komerční převodníky však pracují v rozmezí 2 – 10 MHz [63]. K dosažení tak vysokých frekvencí slouží tyto MEMS převodníky, jejichž funkčnost byla demonstrována až do 50 MHz [64].

Rezonátory mohou pracovat ve dvou módech – statickém a dynamickém. Díky změně rezonanční frekvence lze velmi přesně měřit plynové a vodní prostředí jako jsou chemické výpary a detekce biomolekul. Dalším využitím může být detekce chemických ukazatelů u různých nemocí ještě před vypuknutím prvních symptomů u pacienta. Současné zaměření se věnuje maximalizaci citlivosti, omezení nesprávných hlášení a vývoj systémů pro paralelní detekci libovolných molekul [9]. Ze změny rezonanční frekvence se následně dá zjistit i váha daného prvku. Tato měření jsou velmi

precizní a je jimi za přesně definovaných podmínek možno zvážit hmotnosti až v jednotkách zeptogramů ($1 \text{ zg} = 10^{-21} \text{ g}$) [10].

Další specifickou aplikací rezonančních struktur je mikroskopie atomárních sil (AFM – Atomic Force Microscopy). Ta využívá velmi ostrého hrotu na mikro nosníku, s konstantou pružnosti menší, než jsou ekvivalentní pružnosti mezi jednotlivými atomy, což dovoluje zobrazovat jak vodivé tak nevodivé materiály na atomové úrovni [60,65].

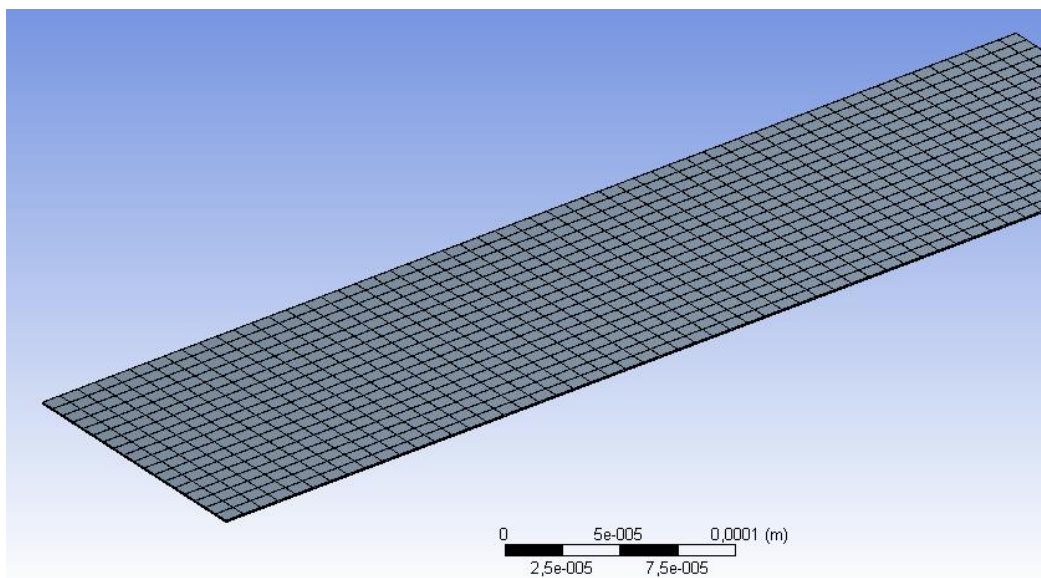
5 SIMULACE PIEZOREZONÁTORŮ

Následující část se věnuje modelování piezoelektrických MEMS rezonátorů v prostředí ANSYS® Workbench 17.2. Hlavním úkolem těchto simulací je zjistit jaký vliv má geometrie rezonátorů na jejich rezonanční frekvenci.

5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (FEM – Finite Element Modeling) byla vyvinuta již v 50. letech 20. století za účelem potřeby výpočtů konstrukcí v leteckém, kosmickém, jaderném a vojenském průmyslu. Princip spočívá v rozdělení objektu na určitý počet definovaných prvků (meshing). Konečný prvek je uspořádaná trojice (K, P, Σ) , kde K je prvek, P je prostor definovaných funkcí na K a Σ je konečná množina tzv. stupňů volnosti definovaných na P . Pro každý tento prvek se pak následně vypočítají sady diferenciálních rovnic, jejichž výsledky pak určují výslednou deformaci případně velikosti pnutí a jiné [66].

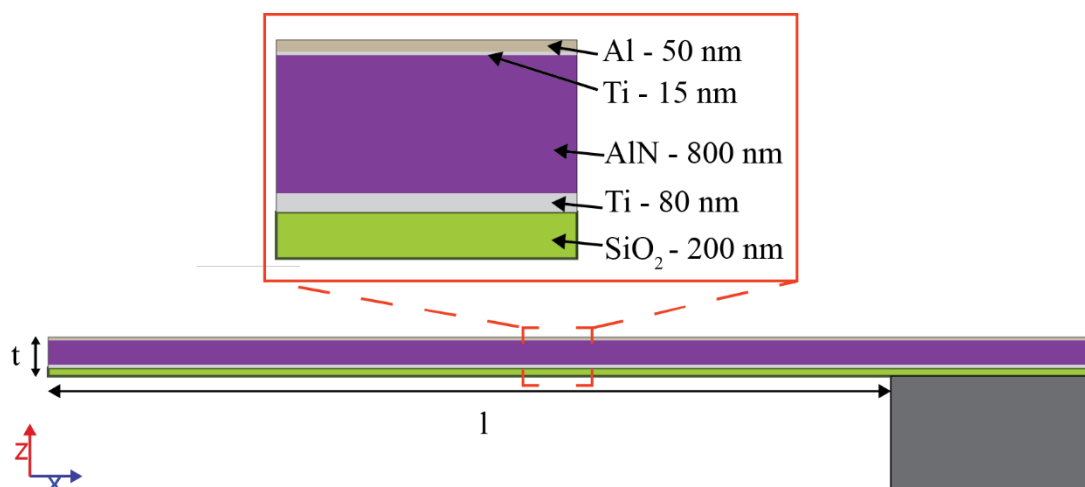
Výsledná síť použitá pro všechny simulace je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Použitá síť rezonátorů

5.1.1 Použité materiály

Základní struktura rezonátorů je zobrazena na obr. 5.2. Použité materiály jsou SiO_2 , Ti, AlN a Al. Všechny vrstvy jsou biokompatibilní a lze je připravit CMOS procesem.



Obr. 5.2: Schématické znázornění jednostranně vetknutého nosníku s detailem na rozložení a tloušťky tenkých vrstev

Vrchní elektroda se skládá ze dvou vrstev Ti/Al, kde Ti slouží jako adhezní vrstva pro Al. Materiálové vlastnosti zadané do programu ANSYS udává tab. 5-1. Jelikož se AlN nechová jako izotropní materiál, bylo nutné mu přiřadit anizotropní vlastnosti viz níže.

Tab. 5-1: Materiálové konstanty použitých materiálů

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Poissonovo číslo [-]	Youngův modul [GPa]
SiO₂	2300	0,25	85
Al	2689	0,35	70
Ti	4510	0,32	116

Anizotropní (směrové) vlastnosti AlN materiálu udávají následující matice, kde se vyskytuje matice tuhosti c (5.1), piezoelektrická matice pnutí e (5.2) a dielektrická matice ε (5.3) [67].

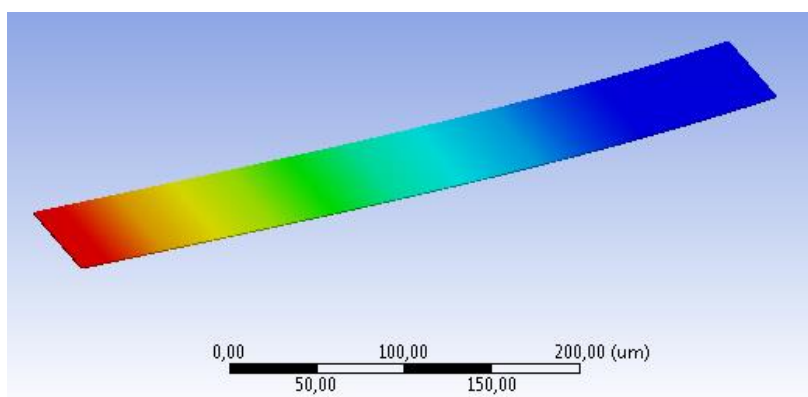
$$[c] = \begin{bmatrix} 3,45 & 1,25 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,25 & 3,45 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,20 & 1,20 & 3,95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,10 \end{bmatrix} [10^{11} Pa] \quad (5.1)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0,48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,48 & 0 & 0 \\ -0,58 & -0,58 & 1,55 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C/m^2] \quad (5.2)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} 8,0 & 0 & 0 \\ 0 & 8,0 & 0 \\ 0 & 0 & 9,5 \end{bmatrix} [10^{-11} F/m] \quad (5.3)$$

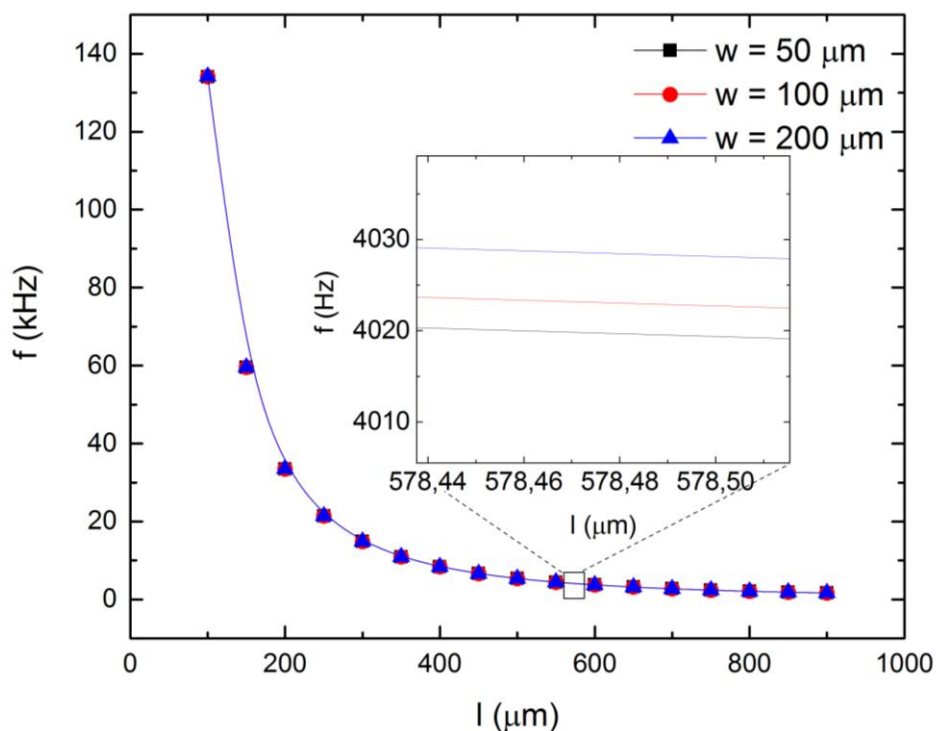
5.2 Výsledky modální analýzy

Modální analýza slouží k zjištění jednotlivých módů (rezonančních frekvencí, eigenfrequency) struktur bez působení vnějších sil. Nejprve byl simulován vliv délky rezonátoru (l) při konstantní šířce a poté vliv šířky (w) při neměnné délce. Výchozí rozměr byl zvolen jako $l = 500 \mu m$, $w = 50 \mu m$ s rezonanční frekvencí 5360 Hz, zobrazený na obr. 5.3. K upevnění čelní strany rezonátoru byl použit prvek *Displacement* a jeho výchylka nastavena ve všech osách na 0 m.



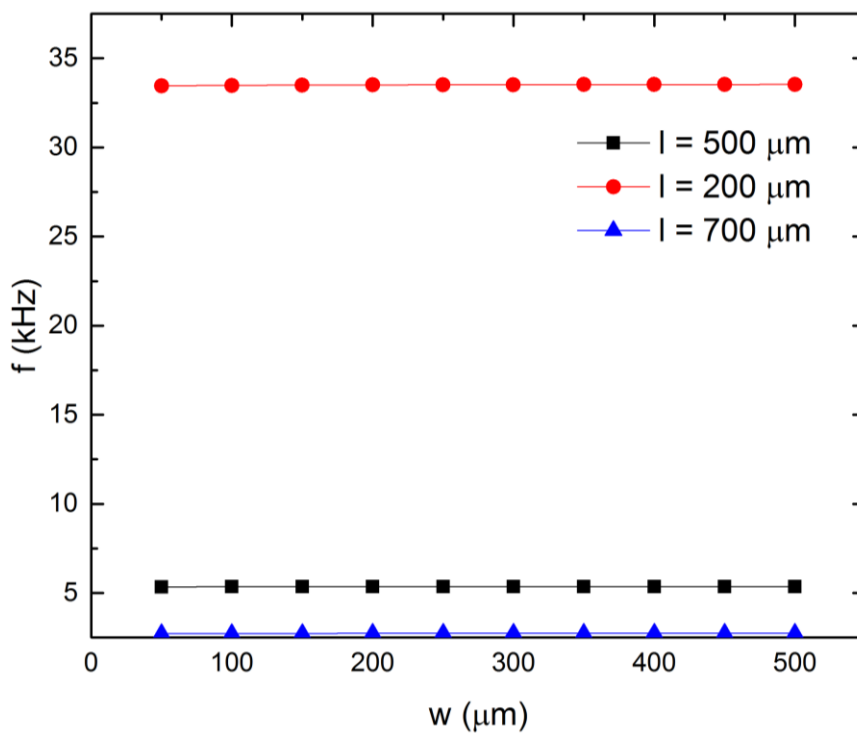
Obr. 5.3: Rezonátor uchycený na jednom konci o rozměrech $(50 \times 500) \mu m$ při první rezonanční frekvenci $f_r = 5360 \text{ Hz}$

Na obr. 5.4 lze vidět závislost rezonanční frekvence na délce rezonátoru pro tři různé šířky rezonátorů, ovšem jednotlivé rezonanční frekvence se liší průměrně jen o 5-400 Hz tudíž na takto vysokém frekvenčním rozsahu splývají dohromady.



Obr. 5.4: Závislost rezonanční frekvence na délce pro rezonátor ukotvený na jednom konci

Obr. 5.5 ukazuje závislost rezonanční frekvence na šířce rezonátoru. Lze pozorovat, že šířka rezonátorů nemá výrazný vliv na výslednou rezonanční frekvenci. Křivka má velmi malý růst. Celkově k dosažení větších rezonančních frekvencí je třeba menších rozměrů.

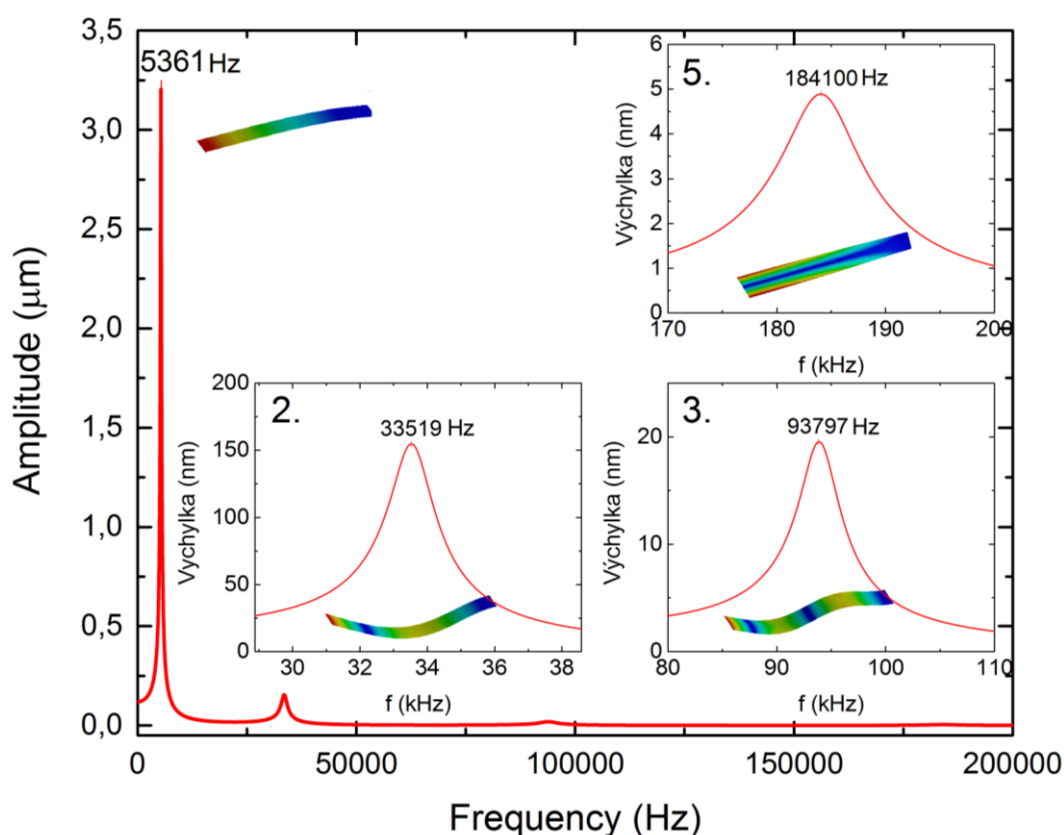


Obr. 5.5: Závislost rezonanční frekvence na šířce pro rezonátor ukotvený na jednom konci

Jako další byla zkoumána rezonanční frekvence v případě, kdy byl rezonátor o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ upevněn na obou koncích. První rezonanční frekvence byla stanovena na 34108 Hz, což je 6krát více než u rezonátoru upevněného jen na jednom konci.

5.3 Výsledky harmonické analýzy

Harmonická analýza je používána ke zjištění odezvy struktury na harmonicky aplikovanou působící sílu, v tomto případě napětí. K tomuto byly použity dva prvky *Voltage*, jeden jako vrchní elektroda s aplikovaným napětím 1 V a druhý jako spodní elektroda s potenciálem 0 V. Obr. 5.6 zachycuje závislost výchylky na frekvenci pro prvních pět módů, z nichž se čtvrtý neprojevil (100 kHz). Z obrázku je patrné, že amplituda jednotlivých módů výrazně klesá s rostoucí frekvencí.



Obr. 5.6: Frekvenční závislost výchylky rezonátoru ukotveného na jednom konci o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ s přiloženým napětím 1 V pro prvních pět rezonančních frekvencí

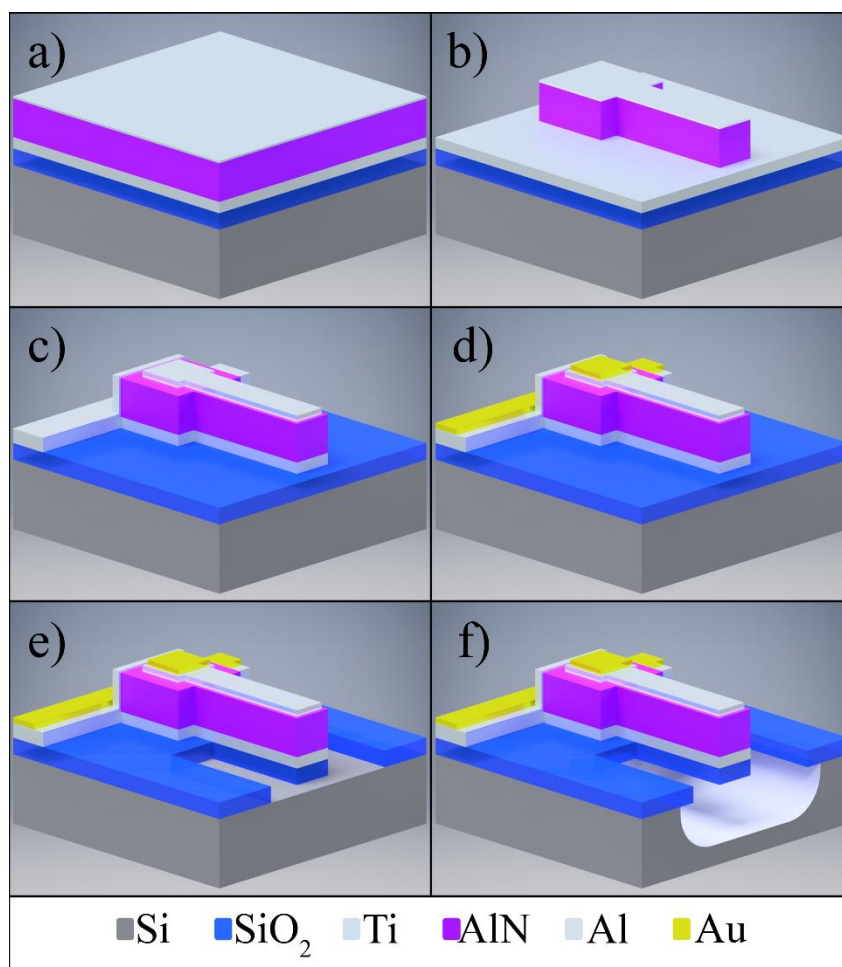
6 VÝROBA A CHARAKTERIZACE

Tato kapitola se zabývá praktickou výrobou piezoelektrických rezonátorů pomocí postupů popsanych v předchozích kapitolách s detailním popisem procesních kroků. Následuje charakterizace vyrobených čipů pro ověření funkčnosti rezonátorů a správnosti simulací.

6.1 Výroba

Výroba začíná návrhem struktur ve vhodném programu schopném generovat typ souboru gds pro laserový litograf (DWL – direct write lithography). Layout byl navržen v programu KLayout verze 0.24.9. Struktury byly uspořádány do čipů a velikosti (8×8) mm. Tento rozměr je vyhovující pro upevnění čipu do pouzdra leadless chip carrier s 68 vývody (LCC 68). Po návrhu rozložení čipů na desce se může přejít ke vlastní výrobě.

Celý výrobní proces znázorňuje obr. 6.1. Skládá se ze šesti základních kroků. Jednotlivé kroky jsou rozděleny depozičními, leptacími a litografickými procesy, které určují, jaké části zůstanou nebo budou vytvořeny.

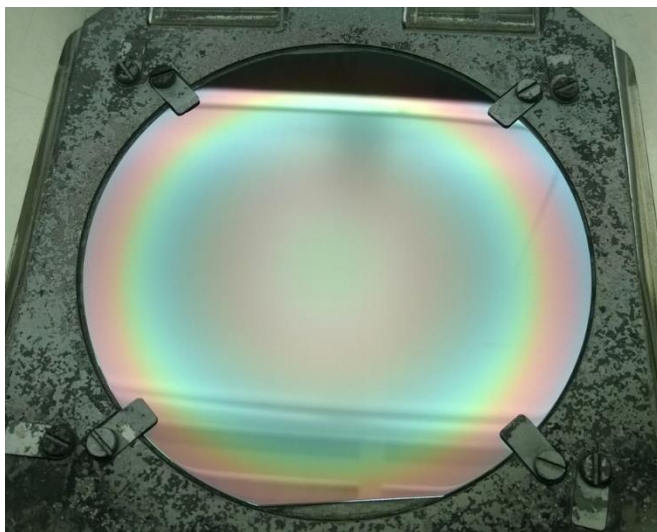


Obr. 6.1: Schématické znázornění výrobního procesu a) depozice vrstev, b) leptání AlN s Ti maskou, c) vytvoření Al elektrod, d) vytvoření ploch pro wire-bonding, e) odleptání SiO₂, f) odleptání Si v XeF₂ pro uvolnění rezonátoru

1. krok – depozice materiálů

Výchozím materiálem pro výrobu je 4" Si (100) wafer, na který se postupně deponují všechny vrstvy kromě vrchního Al pro výrobu vrchní elektrody (obr. 6.2). Jako strukturní vrstva je použito ≈ 200 nm SiO_2 deponovaného pomocí PECVD. Další vrstvy jsou deponovány pomocí IBD/IBAD bez vystavení waferu vzduchové atmosféře, čímž je zabráněno případné kontaminaci vlhkostí či prachem.

Všechny vrstvy využívají procesu IBD, pouze AlN je nutné deponovat pomocí IBAD, tj. v ionizované dusíkové atmosféře, aby došlo k vytvoření námi požadovaného prvku s požadovanou kvalitou krystalů. Správná orientace a malá rozorientace (menší než $\pm 1^\circ$) krystalů AlN (001) je zajištěna díky správným depozičním parametrům a růstu na spodní Ti (001) elektrodě. Kvalitní růst AlN vrstvy je ovlivněn tím, že jsou mřížové parametry Ti a AlN podobné.



Obr. 6.2: 4" Wafer s deponovanými vrstvami ≈ 200 nm SiO_2 , ≈ 80 nm Ti, ≈ 800 nm AlN, ≈ 15 nm průsvitného Ti (lze pozorovat nehomogenitu IBD)

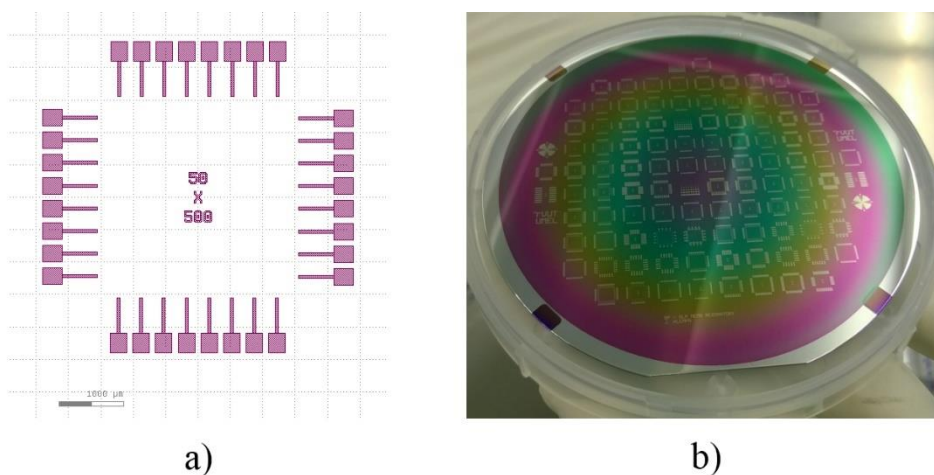
2. krok – tvarování piezoelektrické vrstvy

Úkolem druhého kroku je odleptání AlN mimo místa s rezonátory. K vytvoření motivu je použit negativní fotorezist AR-N 4340. Nejprve je wafer vyhřát na teplotu 180°C pro aplikování HMDS promotoru, který zaručí správnou adhezi fotorezistu. Po vyhřátí probíhá napouštění HMDS do komory po dobu 3 s a poté probíhá po dobu 45 s reakce s povrchem. Celý cyklus je ukončen odsátím zbytků reakce a celkově probíhá 9 cyklů. Poté se wafer nechá vychladnout na okolní teplotu a umístí se do spin-coateru. Na povrch waferu se nanese 4 ml fotorezistu a wafer se roztočí na 4000 ot/min po dobu 60 s se zrychlením 1500 ot/s, čímž dojde k vytvoření vrstvy fotorezistu o tloušťce $\approx 1,4$ μm . Po dokončení operace je nutné dát wafer na vyhřívací plotnu. Wafer se nechá 60 s na plotně při teplotě 90°C , čímž dojde k jeho vytvrzení a odpaření rozpouštědel. Tímto je wafer připraven na expozici, která probíhala pomocí systému DWL, kde laserový paprsek přímo osvětluje části podle motivu (obr. 6.3a). Po expozici musí dojít k vyvolání osvětlených míst. U negativního fotorezistu je výrobcem doporučován tzv. crosslink bake, tedy zesíťování struktur před vyvoláním zahřátím na 95°C po dobu 2 minut. K vyvolání byla použita vývojka AR 300-475 po dobu 60 s následovaná důkladným oplachem vodou a ofouknutím dusíkem. Posledním krokem v litografii je proces zvaný „descum“, který spočívá ve vložení vyvolaného waferu do O_2 plazmy za účelem odstranění případných

reziduí fotorezistu v místě, kde byl fotorezist odstraněn v průběhu vyvolávání. Všechny tyto kroky jsou prováděny při každé litografii, pouze s upravením parametrů odpovídajícím jednotlivým fotorezistům.

Po litografii následuje suché leptání Ti vrstvy, které umožní přístup pro následné mokré leptání AlN v TMAH, a zároveň slouží jako maska pro leptání, jelikož TMAH neleptá Ti. Pro odstranění Ti vrstvy je použito RIE Oxford PlasmaPro NGP 80, kde byl wafer vystaven účinkům plazmy $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ v po dobu 2 minut.

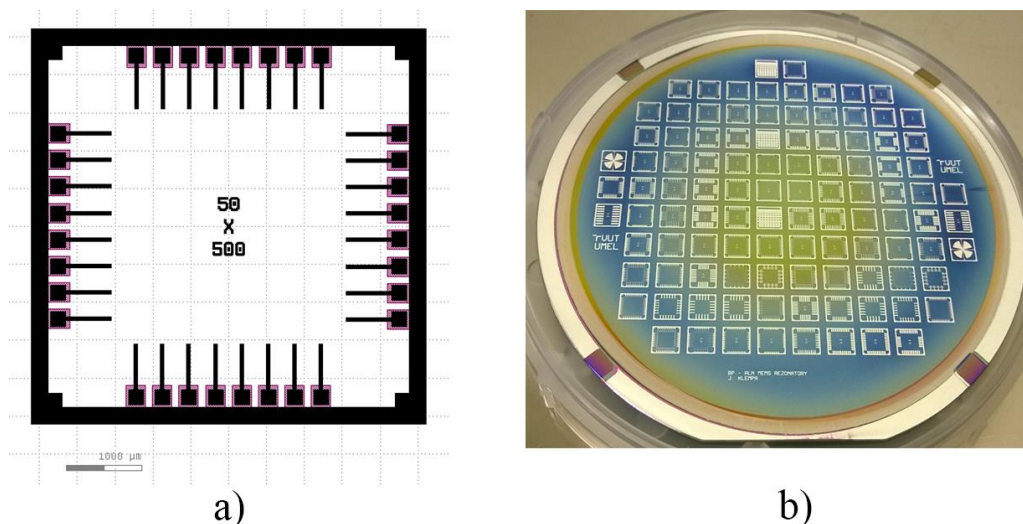
Nyní je wafer připraven k mokrému leptání v 25 % TMAH. Experimentálně byla stanovena rychlost leptání AlN, která je přibližně $\approx 30 \text{ nm/min}$. Při aktivním míchání však rychlost leptání o $\approx 30 \%$ roste. Po ponoření do roztoku byl wafer leptán po dobu 24 minut. K ověření rychlosti leptání byl použit profilometr Bruker Dektak XT. Na obr. 6.3b je zobrazen wafer po odleptání AlN. Vzhledem k procesu mokrého leptání byl fotorezist odstraněn již při leptání. V ostatních případech se používá odstraňovač fotorezistu N-Ethylpyrrolidon (NEP), případně O_2 plazma k dočištění substrátu.



Obr. 6.3: a) motiv piezoelektrické vrstvy, b) wafer po leptání vrchní vrstvy Ti a AlN

3. krok – tvarování elektrod

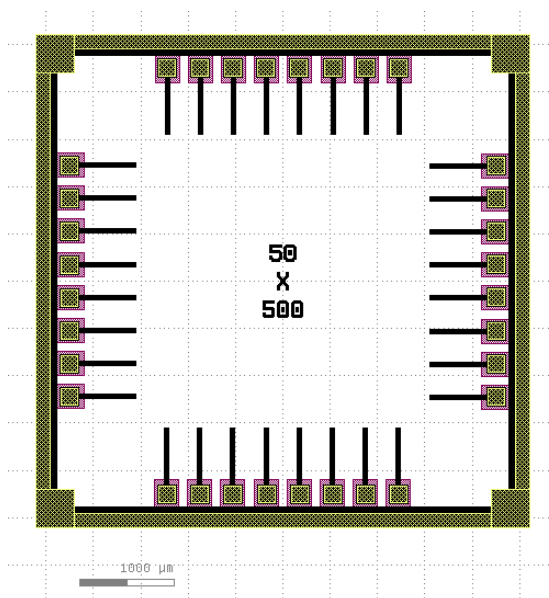
V této části procesu došlo k naprášení vrchního Al pro výrobu vrchní a spodní společné elektrody. Vzhledem k velikosti osvětlené plochy motivu byl opět použit negativní fotorezist AR-N 4340 a provedena litografie (obrázky 6.4a – černě). V návrhu je důležité nechat překrytou část AlN vrstvy při tvarování spodní elektrody tak, aby nedošlo k přerušení kontaktu na spodní elektrodu, kvůli nekompatibilitě par XeF_2 a Ti, kterým je wafer vystaven v posledním kroku. Pomocí RIE v SF_6 plazmě jsou odstraněna místa nechráněná fotorezistem. Vznikne tak rámeček spodní společné elektrody a jednotlivé horní elektrody. Fotorezist byl odstraněn v rozpouštědle NEP. Wafer po tvarování elektrod zachycuje obr. 6.4b.



Obr. 6.4: a) motiv elektrod (černě), b) wafer po vytvarování vrchních elektrod a spodních společných elektrod

4. krok – vytvoření kontaktovacích plošek pro wire-bonding

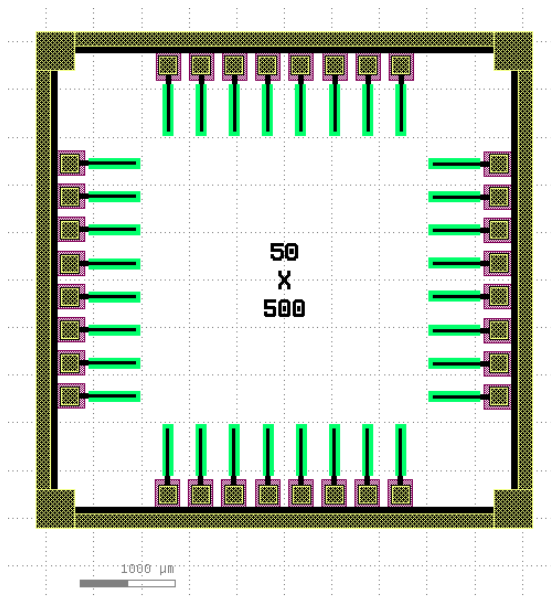
Následující proces slouží k vytvoření plošek na elektrodách pro umožnění elektrického propojení struktur s čipem. Pomocí dvojvrstvy pozitivního fotorezistu AR-P 3540 a podložního lift-off fotorezistu AR-BR 5480 je vytvořen motiv připravený pro depozici (obr. 6.5 – zlatě). Pomocí e-beam napařování je pak deponována adhezní 10 nm Ti vrstva a 500 nm Au vrstva. Následně je wafer ponořen do rozpouštědla fotorezistu, čímž dojde k odtržení materiálu na fotorezistu. Na waferu zůstane materiál jen na místech, kde byl deponován do otvorů fotorezistu po vyvolání.



Obr. 6.5: Motiv pro vytvoření kontaktovacích plošek na horních a spodní elektrode (zlatě)

5. krok – odleptání SiO_2

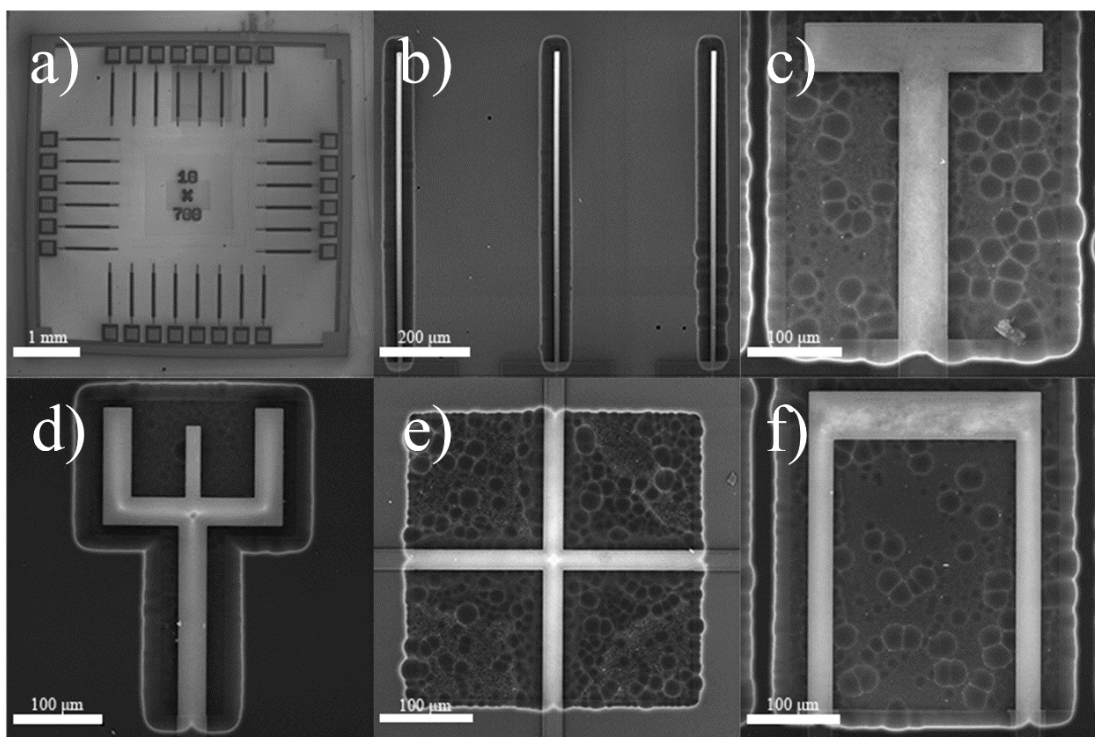
Posledním litografickým krokem je vytvoření motivu, který umožní odleptání SiO_2 okolo rezonátorů (obr. 6.6 – zeleně). Použit byl opět pozitivní fotorezist AR-P 3540. Po expozici a vyvolání bylo použito RIE v $\text{CHF}_4 + \text{O}_2$ plazmě po dobu 5 minut.



Obr. 6.6: Motiv pro odleptání SiO_2 (zeleně)

6. krok – řezání waferu na jednotlivé čipy a podleptávání struktur

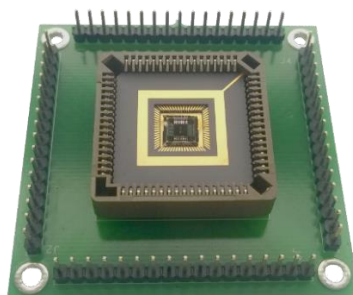
Z důvodu velmi rozdílných rozměrů struktur, a tedy i rozdílného objemu odebraného množství Si byl wafer nejprve nařezán pomocí laserové rezačky Oxford Lasers A-Series a až poté byly podleptávány jednotlivé čipy. Tím dojde k zamezení nežádoucímu podleptání čipu v místech, kde už nesmí být křemík odleptán, protože rychlost leptání je přímo úměrná leptanému objemu. Před řezáním byl wafer pokryt vrstvou pozitivního fotorezistu AR-P 3540, který slouží především jako ochrana před mechanickým poškozením při řezání a manipulaci. Před leptáním Si byl fotorezist z čipu odstraněn v NEP rozpouštědle, opláchnout v IPA a poté vysušen v dusíku. Pro podleptání struktur bylo použito leptání Si za pomoci par XeF_2 . Obr. 6.6 ukazuje SEM fotografie vyrobených rezonátorů.



Obr. 6.7: SEM fotografie vyrobených struktur – a) čip oboustranně vetknutých nosníků (10×700) μm , b) jednostranně vetknutý nosník o rozměrech (10×700) μm , c) rezonátor tvaru „T“, d) rezonátor tvaru „trojzubec“, e) rezonátor tvaru „plus“ ukotvený na všech koncích, f) rezonátor tvaru „U“

Wire-bonding

Elektrické propojení struktur se uskutečnilo pomocí techniky wire-bonding. Čipy byly upevněny voskem do pouzdra LCC 68, které se následně umístilo do patice na DPS s vývody (obr. 6.8). Použitá metoda využívala termosonického principu, při kterém na substrát působí tlak, teplota a ultrazvuk, čímž se zajistí spojení drátku s kontaktovací ploškou. Nejprve je vytvořen spoj (bond) na vrchní elektrodě a následně druhý spoj na čipu LCC 68. Vzhledem ke značně tenkým vrstvám musel být zvolen velmi malý přítlak na vrchní elektrodu, aby nedošlo k mechanickému poškození a tím ke zkratování elektrod. Kontaktování probíhá pomocí techniky wedge-bonding, při které byl použit zlatý drátek o průměru 25 μm . Přítlačná síla pro první bond byla zvolena na 200 μN s působením ultrazvuku po dobu 1 s. Pro druhý bond byla přítlačná síla zvolena 350 μN s působením ultrazvuku po dobu 250 ms.



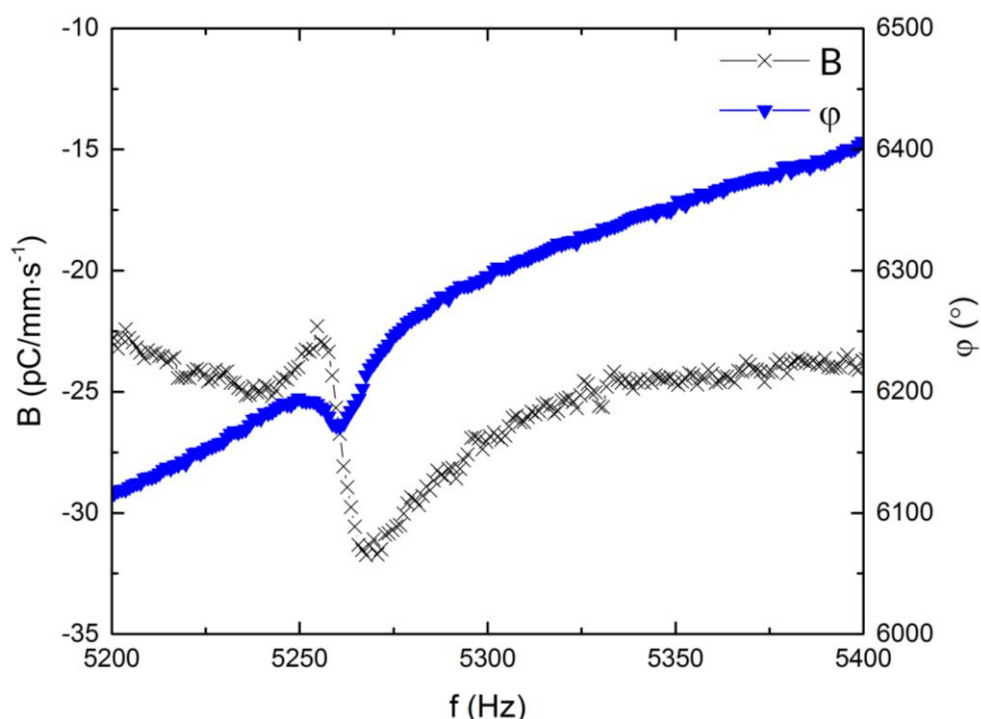
Obr. 6.8: Čip s rezonátory přilepený do pouzdra LCC 68 umístěného do patice na DPS pro elektro-mechanickou charakterizaci

6.2 Charakterizace

V této části jsou srovnány simulované a změřené parametry. Pozornost bude věnována měření parametrů rezonátorů pomocí LCR metru a pomocí vibrometrické metody [68].

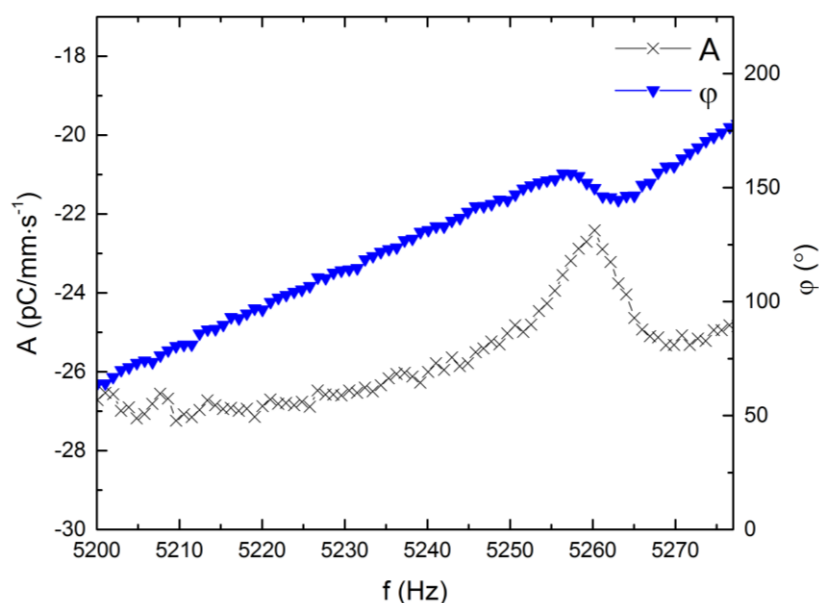
K měření byl použit impedanční analyzátor Keysight E4990A. Ke změření první rezonanční frekvence však tato metoda nebyla příliš vhodná, pravděpodobně z důvodu malého budicího napětí, proto bylo použito externího mechanického buzení za pomoci vibrometrického měření. Vzhledem k omezením vibračního budiče BK4809 a testovací patice bylo možné toto měření provádět pouze do 10 kHz. Generovaný signál se měnil na vibrace, které byly na pouzdru patice měřeny pomocí laserového vibrometru PDV-400. Laserový vibrometr měřil rychlost mechanického pohybu pouzdra s nastavenou citlivostí $200 \text{ mV/mm}\cdot\text{s}^{-1}$). Současně s tím byl měřen generovaný náboj na rezonátoru, který se přes nábojový zesilovač IEPE100 měnil na elektrické napětí. Aplikace v LabVIEW poté z obou signálů pomocí spektrální analýzy počítala poměr signálu rezonátoru a signálu z vibrometru pro každý kmitočet.

Pro nalezení první rezonanční frekvence byla patice nejprve buzena bílým šumem v rozsahu 1-10 kHz, ze kterého se v čase promítla rezonanční špička, ovšem potlačená okolním prostředím. Z obr. 6.9 můžeme vidět rezonanční špičku spolu se změnou fáze. Vzhledem k tomu, že rozměry rezonátorů vůči stopě svazku z laseru byly o několik řádů menší, nelze z měření určit přesnou hodnotu výchylky rezonátoru. Pro přesnou výchylku by bylo nutné laserový paprsek zaměřit přímo na konec rezonátoru.



Obr. 6.9: Závislost přenosu na frekvenci pro rezonátor o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ při buzení bílým šumem

Po nalezení správné frekvence byl signál rozmítán sinusovým signálem (obr. 6.10), který měření potvrzuje. Oba typy měření ukazují na stejnou frekvenci $f_r = 5263 \text{ Hz}$.



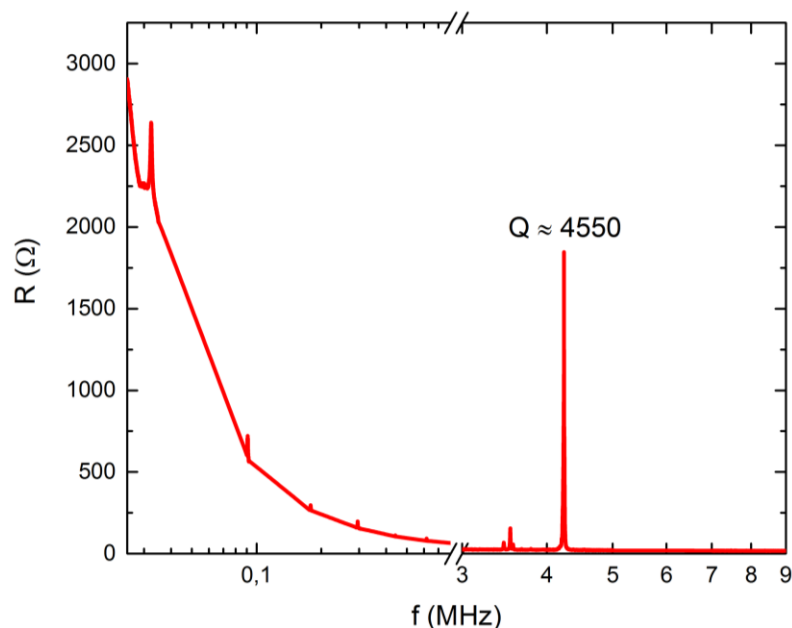
Obr. 6.10: Závislost přenosu signálu na frekvenci pro rezonátor o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ při buzení rozmítaným sinusovým signálem.

Hodnoty získané simulací s naměřenými rezonančními frekvencemi udává tab. 6-1. Je patrné, že odchylka naměřených hodnot od simulovaných je menší než 3 % pro všechny rezonanční frekvence, tudíž lze považovat simulace za odpovídající skutečnosti, s přihlédnutím k množství parametrů, které nemusí přesně odpovídat hodnotám zadávaným do simulace (tloušťka a mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů). Čtvrtá, šestá a některé vyšší rezonanční frekvence nebyly detekovány.

Tab. 6-1: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot pro velikost rezonátoru $(50 \times 500) \mu\text{m}$ u detekovaných rezonančních frekvencí

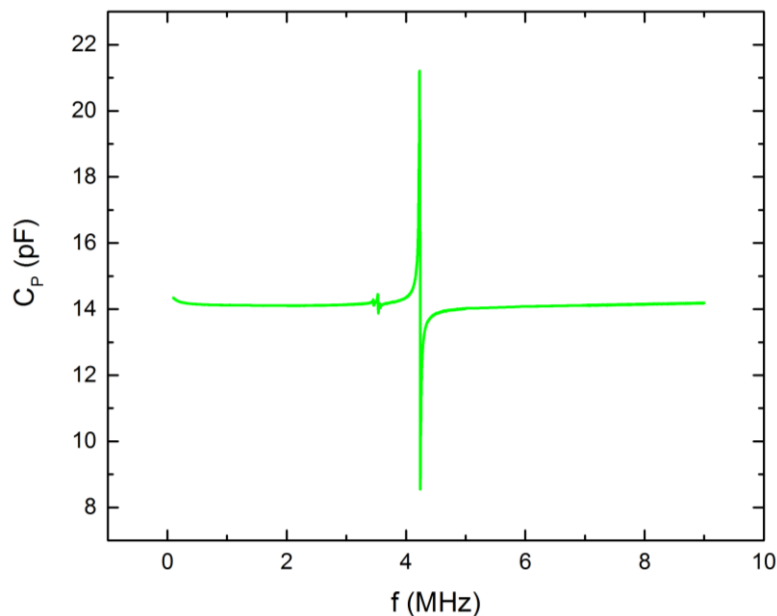
	1.	2.	3.	5.	7.	...	42.	43.
f_m (kHz)	5,2	32	91	178	295	...	3430	4230
f_s (kHz)	5,3	33	93	182	302	...	3530	4360

Pro podobné struktury se v literatuře [68] objevují velmi výrazné rezonanční frekvence na mnohem vyšších frekvencích než základních, proto bylo provedeno měření spektra signálu od 1 MHz do 9 MHz impedančním analyzátozem. Obr. 6.11 ukazuje závislost odporu rezonátoru na frekvenci. Nejvýraznější změna parametrů leží na frekvenci 4,23 MHz. Před touto frekvencí nebyly pozorovány podobné výrazné změny. Výsledky nemohly být srovnány s první rezonanční frekvencí, jelikož nebylo dostupné vhodné měřicí a budicí zařízení schopné mechanicky budit rezonátor do tak vysokých frekvencí. Při porovnání s druhou rezonanční frekvencí však lze usoudit, že první rezonanční kmitočet by mohl být také velmi výrazný. Získané výsledky jsou v souladu s literaturou [51,68]. Podle vzorce (4.4) byl určen Q vrcholku na frekvenci 4,23 MHz na ≈ 4550 .



Obr. 6.11: Závislost odporu rezonátoru o velikostech (50×500) μm na frekvenci

Jedním z dalších sledovaných parametrů byla kapacita rezonátoru C_p , jejíž závislost na frekvenci je vidět na obr. 6.12. Vrcholy se nachází na stejných frekvencích jako při změně vodivosti, ovšem je zde vidět rezonanční ($f_r = 4,22$ MHz) a anti-rezonanční frekvence ($f_a = 4,24$ MHz). Z těchto hodnot bylo podle vzorce (4.5) určeno $k_2^I = 0,64$ %. Tyto rezonance jsou velmi výrazné pravděpodobně z důvodu, že se u nich markantně uplatňuje elektrická složka.

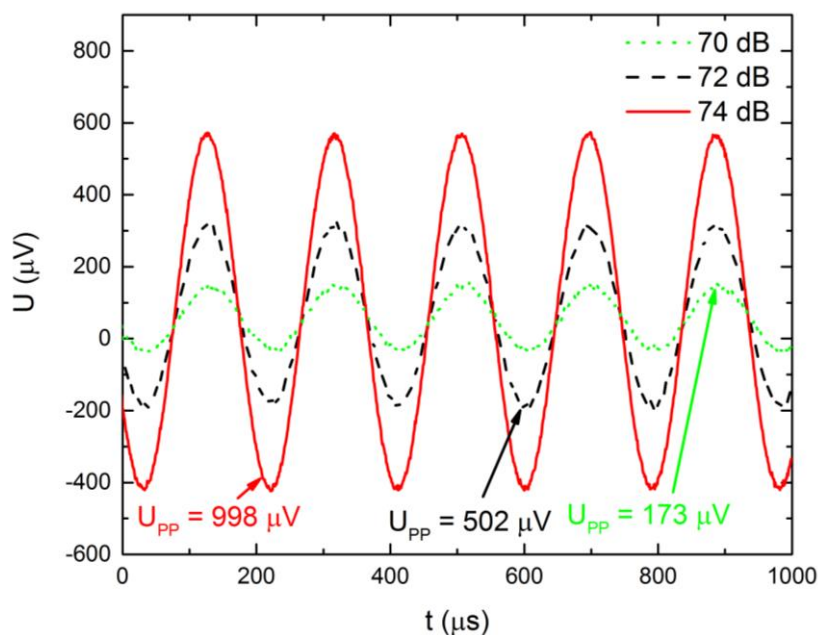


Obr. 6.12: Závislost kapacity rezonátoru o velikostech (50×500) μm na frekvenci

Experimentální ověření funkčnosti rezonátorů

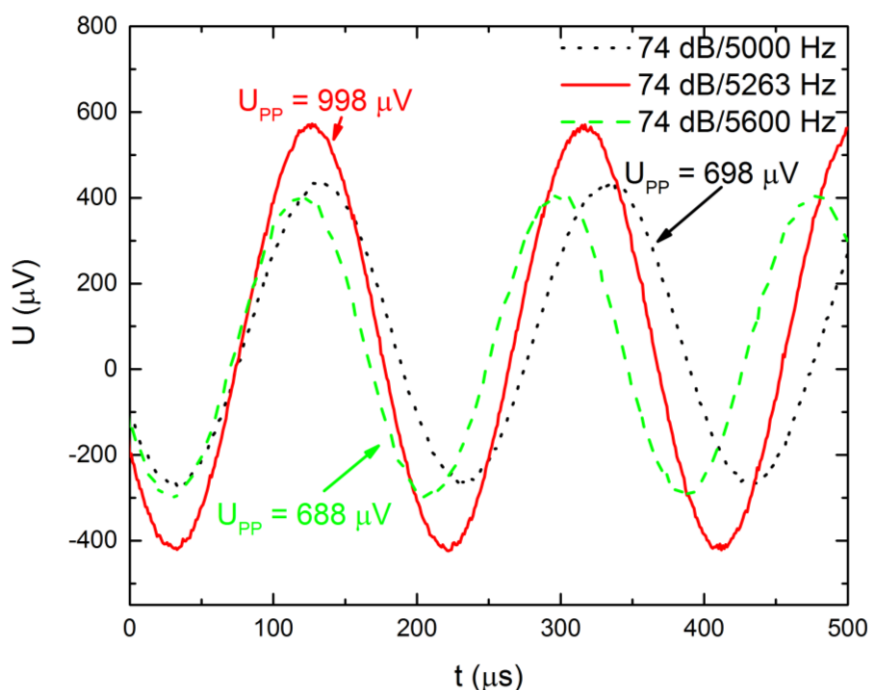
Pro experimentální/aplikační ověření vlastností, byly rezonátory pomocí reproduktoru mechanicky buzeny sinusovým signálem na jeho rezonanční frekvenci. K zobrazení průběhu byl použit osciloskop Keysight DSOX2014A. Obr. 6.13 ukazuje závislost

velikosti generovaného napětí na 1. rezonanční frekvenci 5361 Hz. Pozorovat lze lineární závislost generovaného napětí na velikosti intenzity zvukového buzení. Maximální změřené generované napětí je změřeno jako rozdíl amplitud a činí $U_{PP} = 998 \mu V$.



Obr. 6.13: Napětí generované rezonátorem o velikosti (50×500) při různých úrovních akustického buzení na rezonanční frekvenci $f_r = 5263$ Hz

Pro porovnání velikosti generovaného napětí byl rezonátor buzen i na frekvencích mimo rezonanční. Na obr. 6.14 lze vidět generované napětí na okolních frekvencích, které je přibližně $U_{PP} = 310 \mu V$ nižší než napětí generované při rezonanci.



Obr. 6.14: Napětí generované rezonátorem o velikosti $(50 \times 500) \mu m$ při stejných úrovních akustického buzení mimo rezonanční frekvenci v porovnání s rezonančním kmitočtem $f_r = 5263$ Hz

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámení se s problematikou piezoelektrických MEMS rezonátorů. Byly prostudovány možnosti výroby, výhody i nevýhody různých depozičních systémů, litografické procesy a základy mikroobrábění. Dále byly zkoumány vlastnosti používaných materiálů, jejich biokompatibilita a procesní kompatibilita. Ze získaných poznatků je možné usoudit, že použité materiály musí být vybírány pro konkrétní aplikaci, jelikož ne každý z nich splňuje všechny požadavky.

K pochopení principu funkčnosti rezonátorů byly prostudovány materiály týkající se piezoelektrického jevu a rezonance. Pozornost byla věnována třem základním piezoelektrickým materiálům: AlN, PZT a ZnO. Byly uvedeny rozdíly mezi těmito materiály jako například nekompatibilita PZT s CMOS procesem, ale zato jeho výborné piezoelektrické vlastnosti. V další části byly uvedeny příklady použití piezoelektrických rezonátorů pro různé aplikace.

Další kapitola se věnovala simulacím v programu ANSYS® Workbench. Zkoumány byly především jednoduché obdélníkové rezonátory, jelikož je tento tvar velmi používaný v různých, převážně senzorických aplikacích. Hlavním úkolem simulací byla predikce parametrů rezonátorů. Výsledky simulací ukazují, že pokud se chceme zaměřit na vyšší rezonanční frekvence, je třeba volit menší rozměry nebo omezit stupeň volnosti rezonátoru např. upevněním druhého konce. Při použití dvojité vetknutého nosníku rezonanční frekvence prudce roste až 6krát. Také bylo zjištěno, že šířka rezonátorů nemá významný vliv na jejich rezonanční frekvenci, zásadní je převážně délka rezonátoru, jeho tloušťka a samozřejmě materiálové vlastnosti. Z výsledků harmonické analýzy lze vyčíslit výchylku rezonátorů při harmonickém buzení. Výchylka je lineárně závislá na napětí a činila 3,3 μm při napětí 1 V a s rostoucí frekvencí výrazně klesala.

V praktické části byla představena výroba piezoelektrických MEMS rezonátorů. Výroba probíhala v čistých prostorech Středoevropského technologického institutu (CEITEC), kde byl zrealizován kompletní postup od návrhu layoutu, přes kompletní technologický a výrobní proces, až po zhotovení finálního čipu.

Charakterizaci rezonátorů pomocí dvou technik měření – vibrometrické metody a LCR metru – byla úspěšně ověřena přesnost simulací. Odchylka měření od simulací nepřesáhla u žádné rezonanční frekvence hodnotu 3 %. Q rezonátoru pro 43. rezonanční frekvenci činí ≈ 4550 . Elektromechanický činitel byl stanoven na 0,64 %. Impedanční analyzátor Keysight E4990A nedokázal detekovat první rezonanční frekvenci pravděpodobně kvůli malému budícímu napětí, proto musela být zvolena jiná metoda, tedy mechanické buzení vibračním stolkem. Tato metoda byla ovšem omezena parametry patice a vibračního stolu. I přes omezení však byla úspěšně detekována první rezonanční frekvence. Metoda akustického buzení byla provedena jako finální část charakterizace. Toto měření ukázalo, že rezonátory jsou schopné generovat napětí, které lineárně roste se zvyšující se intenzitou zvuku. Napětí generované rezonátory dosahovalo hodnoty $U_{PP} = 998 \mu\text{V}$. Mimo rezonanční frekvence je generované napětí o $U_{PP} \approx 310 \mu\text{V}$ nižší.

Další studium a výroba piezoelektrických MEMS rezonátorů může využít znalostí získané z této práce. Především upravení rezonančních frekvencí pro požadované aplikace jako jsou například gravimetrická detekce chemických látek, energy harvesting, kochleární filtr a další fyzikální senzory.

LITERATURA

- [1] MALUF, N. a WILLIAMS, K. *Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Artech House, 2004. s. ISBN 9781580535915.
- [2] KÄÄRIÄINEN, T. et al. *Atomic layer deposition : principles, characteristics, and nanotechnology applications*. Salem, MA; Hoboken, NJ: Scrivener Publishing ; Wiley, 2013. s. ISBN 9781118062777.
- [3] PAN, A. I. T. *Monolithic thermal ink jet printhead with integral nozzle and ink feed*. Google Patents.
- [4] STASIAK, J. et al. *Hewlett Packard's inkjet MEMS technology: past, present, and future*. 10.1117/12.819434.
- [5] SASAKI, M. et al. Optical Scanner on a Three-Dimensional Microoptical Bench. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, sv. 21, č. 3, s. 602.
- [6] HORNBECK, L. J. Digital Light Processing™: A new MEMs-based display technology 1996.
- [7] DUDLEY, D. et al. *Emerging digital micromirror device (DMD) applications*. 10.1117/12.480761.
- [8] YAZDI, N. et al. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1998, sv. 86, č. 8, s. 1640-1659. ISSN 0018-9219.
- [9] WAGGONER, P. S. a CRAIGHEAD, H. G. Micro- and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection. *Lab on a Chip*, 2007, sv. 7, č. 10, s. 1238-1255. ISSN 1473-0197.
- [10] BURG, T. P. et al. Weighing of biomolecules, single cells and single nanoparticles in fluid. *Nature*, 2007, sv. 446, č. 7139, s. 1066-1069. ISSN 0028-0836.
- [11] ELFRINK, R. et al. Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, sv. 19, č. 9, s. 094005. ISSN 0960-1317.
- [12] BEEBY, S. P. et al. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 2006, sv. 17, č. 12, s. R175. ISSN 0957-0233.
- [13] GUIMING, Z. et al. DC current measurement utilizing a resonant magnetically actuated piezoresistive microcantilever. *Measurement Science and Technology*, 2013, sv. 24, č. 12, s. 125102. ISSN 0957-0233.
- [14] NAN, T. et al. Self-biased 215MHz magnetoelectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection. *Scientific Reports*, 2013, sv. 3. ISSN 2045-2322.
- [15] ENOKSSON, P. et al. Fluid density sensor based on resonance vibration. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, sv. 47, č. 1, s. 327-331. ISSN 0924-4247.
- [16] BRAND, O. et al. *Resonant MEMS : fundamentals, implementation and application*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. s. ISBN 9783527335459.
- [17] WILSON, W. C. a ATKINSON, G. M. Review of polyimides used in the manufacturing of micro systems 2007.
- [18] GAD-EL-HAK, M. *The MEMS Handbook*. Abingdon; Florence: CRC Press [Imprint] Taylor & Francis Group Taylor & Francis Group [distributor], 2005. s. ISBN 9780849321061.

- [19] BALTES, H. et al. *CMOS MEMS-present and future*. Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on. IEEE, 0780371852.
- [20] BALTES, H. et al. *CMOS-MEMS: Advanced Micro and Nanosystems*. John Wiley & Sons, 2008. s. ISBN 3527616934.
- [21] URANGA, A. et al. CMOS–MEMS resonators: From devices to applications. *Microelectronic Engineering*, 2015, sv. 132, s. 58-73. ISSN 0167-9317.
- [22] BASHIR, R. BioMEMS: state-of-the-art in detection, opportunities and prospects. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2004, sv. 56, č. 11, s. 1565-1586. ISSN 0169-409X.
- [23] MADOU, M. a FLORKEY, J. From batch to continuous manufacturing of microbiomedical devices. *Chem Rev*, 2000, sv. 100, č. 7, s. 2679-2692. ISSN 0009-2665.
- [24] QUAKE, S. R. a SCHERER, A. From micro-to nanofabrication with soft materials. *Science*, 2000, sv. 290, č. 5496, s. 1536-1540. ISSN 0036-8075.
- [25] ARAB, A. a FENG, Q. Reliability research on micro-and nano-electromechanical systems: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, sv. 74, č. 9-12, s. 1679-1690. ISSN 0268-3768.
- [26] WITVROUW, A. et al. Materials issues in the processing, the operation and the reliability of MEMS. *Microelectronic Engineering*, 2004, sv. 76, č. 1–4, s. 245-257. ISSN 0167-9317.
- [27] SESHAN, K. *Handbook of thin film deposition : processes and techniques*. Waltham: William Andrew, 2012. s. ISBN 9781437778731 1437778739.
- [28] MATTOX, D. M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew, 2010. s. ISBN 0815520387.
- [29] SINGH, J. a WOLFE, E. D. Review Nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD). *Journal of Materials Science*, 2005, sv. 40, č. 1, s. 1-26. ISSN 1573-4803.
- [30] SESHAN, K. *Handbook of thin film deposition techniques*. 2002. s. ISBN 978-0-8155-1442-8.
- [31] WILLMOTT, P. R. a HUBER, J. R. Pulsed laser vaporization and deposition. *Reviews of Modern Physics*, 2000, sv. 72, č. 1, s. 315-328.
- [32] LOWNDES, D. H. et al. Synthesis of novel thin-film materials by pulsed laser deposition. *Science*, 1996, sv. 273, č. 5277, s. 898. ISSN 0036-8075.
- [33] SESHAN, K. *Handbook of thin film deposition*. William Andrew, 2012. s. ISBN 978-1-4377-7873-1.
- [34] HUANG, W. et al. Low temperature PECVD SiNx films applied in OLED packaging. *Materials Science and Engineering: B*, 2003, sv. 98, č. 3, s. 248-254. ISSN 0921-5107.
- [35] STOFFEL, A. et al. LPCVD against PECVD for micromechanical applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1996, sv. 6, č. 1, s. 1. ISSN 0960-1317.
- [36] ARTHUR, J. R. Molecular beam epitaxy. *Surface Science*, 2002, sv. 500, č. 1, s. 189-217. ISSN 0039-6028.
- [37] GEORGE, S. M. Atomic layer deposition: an overview. *Chem Rev*, 2010, sv. 110, č. 1, s. 111-131. ISSN 0009-2665.

- [38] THOMPSON, A. G. MOCVD technology for semiconductors. *Materials Letters*, 1997, sv. 30, č. 4, s. 255-263. ISSN 0167-577X.
- [39] AIXTRON. [online]. [cit. 11. 12. 2016]. Dostupné z: <aixtron.com/en/home/>.
- [40] TRUHLÁŘ, B. M. *Příprava polovodičových součástek křemíkovou technologií*. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta,
- [41] GHODSSI, R. a LIN, P. *MEMS materials and processes handbook*. Springer Science & Business Media, 2011. s. ISBN 0387473181.
- [42] VIEU, C. et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Applied Surface Science*, 2000, sv. 164, č. 1–4, s. 111-117. ISSN 0169-4332.
- [43] MAMILLA, V. R. a CHAKRADHAR, K. S. Micro Machining for Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). *Procedia Materials Science*, 2014, sv. 6, s. 1170-1177. ISSN 2211-8128.
- [44] KOVACS, G. T. et al. Bulk micromachining of silicon. *Proceedings of the IEEE*, 1998, sv. 86, č. 8, s. 1536-1551. ISSN 0018-9219.
- [45] RANGELOW, I. W. a LÖSCHNER, H. Reactive ion etching for microelectrical mechanical system fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1995, sv. 13, č. 6, s. 2394-2399.
- [46] GUNN, R. et al. Comparison of etch processes for patterning high aspect ratio and nanoscale features in silicon. *Bristol, UK: Oxford Instruments Plasma Technology Ltd*, 2009.
- [47] MOUSAVI, A. K. et al. Pulsed vacuum and etching systems: Theoretical design considerations for a pulsed vacuum system and its application to XeF₂ etching of Si. *Vacuum*, 2014, sv. 109, s. 216-222. ISSN 0042-207X.
- [48] WINTERS, H. F. a COBURN, J. W. The etching of silicon with XeF₂ vapor. *Applied Physics Letters*, 1979, sv. 34, č. 1, s. 70-73.
- [49] PIAZZA, G. Piezoelectric Resonant MEMS. In *Resonant MEMS*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015, s. 147-172.
- [50] SANDBERG, R. et al. Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, sv. 15, č. 8, s. 1454. ISSN 0960-1317.
- [51] LU, Y. et al. *High frequency and high fill factor piezoelectric micromachined ultrasonic transducers based on cavity SOI wafers*. Proc. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop.
- [52] DAHIYA, R. S. a VALLE, M. Fundamentals of Piezoelectricity. In *Robotic tactile sensing: technologies and system*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [53] TADIGADAPA, S. a MATETI, K. Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives. *Measurement Science and Technology*, 2009, sv. 20, č. 9, s. 092001. ISSN 0957-0233.
- [54] AHMAD, M. A. a PLANA, R. Piezoelectric Coefficients of Thin Film Aluminum Nitride Characterizations Using Capacitance Measurements. *Ieee Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, sv. 19, č. 3, s. 140-142. ISSN 1531-1309.
- [55] TROLIER-MCKINSTRY, S. a MURALT, P. Thin film piezoelectrics for MEMS. *Journal of Electroceramics*, 2004, sv. 12, č. 1-2, s. 7-17. ISSN 1385-3449.
- [56] TONISCH, K. et al. Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, sv. 132, č. 2, s. 658-663. ISSN 0924-4247.

- [57] GERFERS, F. et al. *Sub- μ g Ultra-Low-Noise MEMS Accelerometers Based on CMOS-Compatible Piezoelectric AlN Thin Films*. TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. 10-14 June 2007. 2159-547X.
- [58] REN, D. et al. Design and analyses of a MEMS based resonant magnetometer. *Sensors*, 2009, sv. 9, č. 9, s. 6951-6966.
- [59] BATTISTON, F. M. et al. A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance-frequency and bending readout. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, sv. 77, č. 1-2, s. 122-131. ISSN 0925-4005.
- [60] RUGAR, D. a HANSMA, P. Atomic force microscopy. *Physics today*, 1990, sv. 43, č. 10, s. 23-30. ISSN 0031-9228.
- [61] RUBY, R. C. et al. *Thin film bulk wave acoustic resonators (FBAR) for wireless applications*. Ultrasonics Symposium, 2001 IEEE. 2001.
- [62] ELFRINK, R. et al. Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, sv. 19, č. 9, s. 094005. ISSN 0960-1317.
- [63] FOSTER, F. S. et al. Advances in ultrasound biomicroscopy. *Ultrasound in medicine & biology*, 2000, sv. 26, č. 1, s. 1-27. ISSN 0301-5629.
- [64] MINA, I. G. et al. High frequency piezoelectric MEMS ultrasound transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, sv. 54, č. 12, s. 2422-2430. ISSN 0885-3010.
- [65] BINNIG, G. et al. Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters*, 1986, sv. 56, č. 9, s. 930-933.
- [66] KŘÍŽEK, M. Padesát let metody konečných prvků. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 1992, sv. 37, č. 3, s. 129-140. ISSN 0032-2423.
- [67] Conference Proceedings TSUBOUCHI, K. et al. *AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si*. 1981 Ultrasonics Symposium. IEEE,
- [68] CLEMENT, M. et al. *Frequency Characterization of AlN Piezoelectric Resonators*. Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International. IEEE, 1424406463.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Termální napařování.....	12
Obr. 1.2: Schéma iontového napařovacího zařízení.....	14
Obr. 1.3: Schématické znázornění principu PLD	14
Obr. 1.4: Princip CVD depozice polykrystalického Si pomocí SiH_4	15
Obr. 1.5: Schéma PECVD reaktoru	16
Obr. 1.6: Princip ALD depozice Al_2O_3 vrstev střídavým napouštěním prekurzorů Trimethylaluminia (TMA) a H_2O	17
Obr. 1.7: Otevřený MOCVD reaktor [39]	18
Obr. 2.1: Rozdíl mezi pozitivním a negativním fotorezistem.....	20
Obr. 2.2: Průběh depozice fotorezistu při rotačním nanášení pomocí spin-coateru	20
Obr. 2.3: a) Expozice fotorezistu a jeho následné b) vyvolání	20
Obr. 2.4: Přenos motivu a) depozicí, b) leptáním	21
Obr. 2.5: Znázornění technologie lift-off – vystavení fotorezistu rozpouštědлу, které jej odplaví spolu s deponovaným materiálem.....	21
Obr. 3.1: a) Izotropní leptání a b) anizotropní leptání křemíkového substrátu s (100) orientací.....	22
Obr. 4.1: Proces pólování – a) před procesem, b) při procesu, c) po procesu	25
Obr. 4.2 a) MEMS akcelerometr [57], b) magnetometr [58], c) pole chemických senzorů [59], d) špička na mikro nosníku pro AFM [60].....	28
Obr. 5.1: Použitá síť rezonátorů.....	30
Obr. 5.2: Schématické znázornění jednostranně vetknutého nosníku s detailem na rozložení a tloušťky tenkých vrstev	31
Obr. 5.3: Rezonátor uchycený na jednom konci o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ při první rezonanční frekvenci $f_r = 5360 \text{ Hz}$	32
Obr. 5.4: Závislost rezonanční frekvence na délce pro rezonátor ukotvený na jednom konci.....	33
Obr. 5.5: Závislost rezonanční frekvence na šířce pro rezonátor ukotvený na jednom konci	33
Obr. 5.6: Frekvenční závislost výchylky rezonátoru ukotveného na jednom konci o rozměrech $(50 \times 500) \mu\text{m}$ s přiloženým napětím 1 V pro prvních pět rezonančních frekvencí	34
Obr. 6.1: Schématické znázornění výrobního procesu a) depozice vrstev, b) leptání AlN s Ti maskou, c) vytvoření Al elektrod, d) vytvoření ploch pro wire-bonding, e) odleptání SiO_2 , f) odleptání Si v XeF_2 pro uvolnění rezonátoru	35
Obr. 6.2: 4" Wafer s deponovanými vrstvami $\approx 200 \text{ nm SiO}_2$, $\approx 80 \text{ nm Ti}$, $\approx 800 \text{ nm AlN}$, $\approx 15 \text{ nm}$ průsvitného Ti (lze pozorovat nehomogenitu IBD).....	36
Obr. 6.3: a) motiv piezoelektrické vrstvy, b) wafer po leptání vrchní vrstvy Ti a AlN .	37

Obr. 6.4: a) motiv elektrod (černě), b) wafer po vytvarování vrchních elektrod a spodních společných elektrod	38
Obr. 6.5: Motiv pro vytvoření kontaktovacích plošek na horních a spodní elektrodě (zlatě)	38
Obr. 6.6: Motiv pro odleptání SiO ₂ (zeleně).....	39
Obr. 6.7: SEM fotografie vyrobených struktur – a) čip oboustranně vetknutých nosníků (10 × 700) μm, b) jednostranně vetknutý nosník o rozměrech (10 × 700) μm, c) rezonátor tvaru „T“, d) rezonátor tvaru „trojzubec“, e) rezonátor tvaru „plus“ ukotvený na všech koncích, f) rezonátor tvaru „U“	40
Obr. 6.8: Čip s rezonátory přilepený do pouzdra LCC 68 umístěného do patice na DPS pro elektro-mechanickou charakterizaci	40
Obr. 6.9: Závislost přenosu na frekvenci pro rezonátor o rozměrech (50 × 500) μm při buzení bílým šumem	41
Obr. 6.10: Závislost přenosu signálu na frekvenci pro rezonátor o rozměrech (50 × 500) μm při buzení rozmítaným sinusovým signálem.	42
Obr. 6.11: Závislost odporu rezonátoru o velikostech (50 × 500) μm na frekvenci.....	43
Obr. 6.12: Závislost kapacity rezonátoru o velikostech (50 × 500) μm na frekvenci	43
Obr. 6.13: Napětí generované rezonátorem o velikosti (50 × 500) při různých úrovních akustického buzení na rezonanční frekvenci $f_r = 5263$ Hz	44
Obr. 6.14: Napětí generované rezonátorem o velikosti (50 × 500) μm při stejných úrovních akustického buzení mimo rezonanční frekvenci v porovnání s rezonančním kmitočtem $f_r = 5263$ Hz	44

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AFM	Atomic Force Microscopy	Mikroskopie atomárních sil
ALD	Atomic Layer Deposition	Depozice atomových vrstev
APCVD	Atmosferic Pressure CVD	CVD za atmosferického tlaku
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	Technologie kov-oxid-polovodič
CVD	Chemical Vapor Deposition	Chemická depozice z plynné fáze
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DLP	Digital Light Processing	Digitální zpracování světla
DMD	Digital Micromirror Device	Digitální mikrozrcátka
DRIE	Deep Reactive Ion Etching	Hlubkové reaktivní iontové leptání
DWL	Direct Write Lithography	Laserový litograf
E-beam	Electron beam	Elektronový svazek
EBL	Electron Beam Lithography	Elektronová litografie
FEM	Finite Element Model	Metoda konečných prvků
IBAD	Ion Beam Assisted Deposition	Naprašování pomocí iontových svazků s asistenčním zdrojem
IBD	Ion Beam Deposition	Naprašování pomocí iontových svazků
LCC	Leadless Chip Carrier	Bezvývodové pouzdro
LPCVD	Low Pressure CVD	Nízkotlaké CVD
MBE	Molecular Beam Epitaxy	Molekulární svazková epitaxe
MEMS	MicroElectroMechanical Systems	Mikroelektromechanické systémy
MOCVD	Metal Organic CVD	CVD za použití organokovových sloučenin
MST	MicroSystem Technology	Mikrosystémová technologie
PECVD	Plasma Enhanced CVD	Plazmou asistovaná CVD
PLD	Pulsed Laser Deposition	Pulzní laserová depozice
PVD	Physical Vapor Deposition	Fyzikální depozice z plynné fáze
PZT	PbZrO ₃ (PZ) a PbTiO ₃ (PT)	Pevný roztok PbZrO ₃ (PZ) a PbTiO ₃ (PT)
RF	Radio Frequency	Radiová frekvence
RIE	Reactive Ion Etching	Reaktivní iontové leptání
SEM	Scanning Electron Microscopy	Rastrovací elektronový mikroskop
UHV	Ultra High Vacuum	Ultra vysoké vakuum
UV	Ultra Violet (light)	Ultra fialové (záření)
<i>f_r</i>	Rezonanční frekvence	Hz
<i>f_a</i>	Antirezonanční frekvence	Hz
<i>d_{ij}</i>	Piezoelektrická nábojová konstanta	pm/V
<i>e_{ij}</i>	Piezoelektrická konstanta pružnosti	Cm ⁻²
<i>ε_{ij}</i>	Směrová permitivita materiálu	-